T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORTA GERİLİM KABLO İZOLASYON MALZEMELERİNİN PERFORMANS FAKTÖRLERİNİN İNCELENMESİ

Yusuf Can GÖKTAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Elektrik Tesisleri Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ramazan AYAZ

Eş Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Celal Fadıl KUMRU

Şubat, 2025

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORTA GERİLİM KABLO İZOLASYON MALZEMELERİNİN PERFORMANS FAKTÖRLERİNİN İNCELENMESİ

Yusuf Can GÖKTAŞ tarafından hazırlanan tez çalışması 26.02.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Elektrik Mühendisliği Programı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Ramazan AYAZ Yıldız Teknik Üniversitesi Danışman	Dr. Öğr. Üyesi Celal Fadıl KUMRU Süleyman Demirel Üniversitesi Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Ramazan AYAZ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Oktay ARIKAN, Asıl Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Hakan AKÇA, Asıl Üye
Ege Üniversitesi _____

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ramazan AYAZ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Orta Gerilim Kablo İzolasyon Malzemelerinin Performans Faktörlerinin İncelenmesi" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Yusuf Can GÖKTAŞ

İmza

Sevgili Aileme ve Müstakbel Eşime…

TEŞEKKÜR

Günümüz dünyasında teknoloji, enerjiye bağımlı olarak sürekli gelişmekte ve geliştikçe daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Buna bağlı olarak enerjinin sürekli ve kaliteli bir şekilde üretilmesi, iletilmesi ve dağıtılması büyük önem arz etmektedir. Kablolar da bu enerjinin taşınmasında en önemli faktörlerden biridir. Bu açıdan, coğrafya, iklim ve doğal afetler gibi birçok başka faktöre göre çalışma koşulları değişen kabloların, bu koşullara nasıl tepki verdiğini ve fiziksel, elektriksel olarak kendisini koruyan izolasyonun bu farklılıklardan nasıl etkilendiğini anlamak önemli bir hale gelmiştir. Tez çalışmasında özellikle yeraltı kablolarında kullanılan bazı izolasyon malzemelerinin farklı fiziksel koşullarda elektriksel ve fiziksel özelliklerinin nasıl değiştiği incelenip, kablo izolasyon malzemesi üzerinde hangi faktörlerin ne ölçüde etkili olduğu ortaya koyulmaya çalışılmıştır.

Çalışmalarımda her an bana destek olan sayın danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Ramazan AYAZ'a, fikirleri ve tecrübesiyle yol gösteren Dr. Öğr. Üyesi Celal Fadıl KUMRU'ya, Doç. Dr. Oktay ARIKAN'a, deney çalışmalarına yaptığı katkılardan dolayı Arş. Gör. Fırat AKIN'a, numune ve laboratuvar konusunda desteklerini esirgemeyen Kabkom Kimya San. ve Tic. AŞ'ye, Ünka Kablo San. ve Tic. AŞ'ye, beni bu günlere getiren aileme ve desteğini hiç esirgemeyen müstakbel eşime sonsuz teşekkür ederim.

Şubat, 2025

Yusuf Can GÖKTAŞ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viii

KISALTMA LİSTESİ ix

ŞEKİL LİSTESİ x

TABLO LİSTESİ xiv

ÖZET xvii

ABSTRACT xviii

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 2

1.2 Tezin Amacı 8

1.3 Tezin Literatüre Katkıları 9

2 KABLOLARDA KULLANILAN YALITKANLAR 11

2.1 Polimerler 11

2.1.1 Polimer Yapısı ve Sentezlenmesi..……12

2.1.2 Kritalizasyon ve Erime Davranışı ……15

2.1.3 Mekanik Özellikler ……..……16

2.1.3 Dolgu Maddeleri ……..……18

2.2 Termoplastikler 19

2.2.1 Polietilen 19

2.2.2 LDPE, HDPE, LLDPE, VLDPE...……24

2.2.3 Polipropilen...……...……27

2.2.4 Poliüretan.....……...……28

2.2.5 Polivinil Klorür ……...……29

2.2.6 Poliamid …….. ……...……30

2.2.7 Polistiren…….. ……...……31

2.2.8 Halogen-Free, Flame-Retardant Termoplastikler ……31

2.3 Termosetler 34

2.3.1 Çapraz Bağlı Polietilen (XLPE) 37

2.3.2 Etilen Propilen Kauçuk (ERP).....……42

2.3.3 Fenolik Reçineler..……...……43

3 TEST DÜZENEĞİ VE DENEYLER 46

3.1 Test Edilen Numuneler, Üretim Süreçleri ve Deney Koşulları 46

3.2 Uygulanan Testler 55

3.2.1 Dielektrik Kayıp Faktörü ve Kayıp Güç Ölçümleri..……56

3.2.2 Çekme Kopma Testleri...……..……59

3.2.3 Delinme GerilimiTestleri.....……65

4 DENEY SONUÇLARI VE ANALİZLER 68

4.1 Dielektrik Kayıp Faktörü ve Kayıp Güç Deney Sonuçları 68

4.1.1 XLPE Deney Sonuçları…… 68

4.1.2 LDPE Deney Sonuçları.……82

4.1.3 HFFR Termoplastik Deney Sonuçları …… 95

4.2 Çekme Kopma Testi Deney Sonuçları.....109

4.2.1 XLPE Deney Sonuçları……...109

4.2.2 LDPE Deney Sonuçları.……..114

4.2.3 HFFR Termoplastik Deney Sonuçları.....118

4.3 Delinme Gerilimi Deney Sonuçları.....122

4.4 Deney Sonuçlarının Tartışılması.....123

5 SONUÇ 126

KAYNAKÇA **129**

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **134**

SİMGE LİSTESİ

ω	Açısal frekans
εr	Bağıl dielektrik sabiti
ε_0	Boşluğun dielektrik sabiti
P_k	Dielektrik güç kaybı
f	Frekans
V	Gerilim
Gy	Gray
I_c	Kapasitif akım
MPa	Megapascal
R_p	Paralel eşdeğer direnç
C_p	Paralel eşdeğer kapasite
I_r	Rezistif akım
R_s	Seri eşdeğer direnç
C_s	Seri eşdeğer kapasite
tan δ	Tan delta – Dielektrik kayıp faktörü
β	Weibull parametresi

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif Akım
AG	Alçak Gerilim
AO	Anti-oksidan
CF	Eğri Uydurma
DC	Doğru Akım
DCP	Dikümil Peroksit
DT	Karar Ağacı
ERP	Etilen Propilen Kauçuk
FR	Alev Geciktirici
FTIR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
HDPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen
HFFR	Halojen-Free, Flame-Retardant
HRR	Alev Yayılım Hızı
IEC	Uluslararası Eletroteknik Komisyonu
LDPE	Düşük Yoğunluklu Polietilen
LLDPE	Lineer Düşük Yoğunluklu Polietilen
OG	Orta Gerilim
PA	Poliamid
PC	Polikarbonat
PD	Kısmı Deşarj
PP	Polipropilen
PE	Polietilen
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
VLDPE	Çok Düşük Yoğunluklu Polietilen
VLF	Çok Düşük Frekans
XLEPR	Etilen Propilen Kauçuk
XLPE	Çapraz Bağlı Polietilen
YG	Yüksek Gerilim
YSA	Yapan Sinir Ağları

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Polimerizasyon 13
Şekil 2.2 Doğrusal, dallanmış ve çapraz bağlı polimer yapıları 14
Şekil 2.3 Moleküler ağırlık dağılımı 15
Şekil 2.4 İzotaktik, sindiyotaktik ve ataktik polimer zincirleri 16
Şekil 2.5 Polietilen türlerinin zincir yapısı 24
Şekil 2.6 Bir polimer yanma çevriminin şematik gösterimi 34
Şekil 2.7 Kablo izolasyonlarının tarihsel gelişimi 38
Şekil 2.8 Elektrik güç sistemlerinde XLPE uygulamaları 41
Şekil 2.9 E300 oksidasyon şeması 42
Şekil 2.10 Farklı gerilimler altında elektrik ağaçlanması 42
Şekil 3.1 Deneylerin yapıldığı ortam koşulları 47
Şekil 3.2 Deneyde kullanılan numuneler (XLPE, HFFR, LDPE) 48
Şekil 3.3 Termal yaşlandırma fırını 49
Şekil 3.4 Numunelerin fırın içinde görüntüsü 50
Şekil 3.5 Nem kabini 51
Şekil 3.6 Mini ekstrüder 53
Şekil 3.7 LDPE üretim şeması 54
Şekil 3.8 HFFR termoplastik malzeme örneği 55
Şekil 3.9 Deney akış şeması 56
Şekil 3.10 Omicron CPC 100 57
Şekil 3.11 Deney kabı numune şeması 58
Şekil 3.12 Schering köprüsü paralel ve seri modelleme 59
Şekil 3.13 Çekme kopma testi numuneleri 60
Şekil 3.14 Çekme kopma testi numune ölçüleri 61
Şekil 3.15 Pnömatik ekipman 61
Şekil 3.16 Çekme kopma testi numune kalıbı 62
Şekil 3.17 Numune ölçülerinin girildiği arayüz 63
Şekil 3.18 Çekme kopma test cihazı tutacakları 64
Şekil 3.19 Çekme kopma test anı 64
Şekil 3.20 Delinme gerilimi test kabı 65
Şekil 3.21 Delinme gerilimi test cihazı kullanıcı paneli 66

Şekil 4.1 XLPE yaşlandırma öncesi dielektrik kayıp faktörü 69
Şekil 4.2 XLPE yaşlandırma öncesi kayıp güç 69
Şekil 4.3 XLPE dielektrik kayıp faktörü (Termal 1. hafta yaşlandırma sonuçları) 70
Şekil 4.4 XLPE kayıp güç (Termal 1. hafta yaşlandırma sonuçları) 70
Şekil 4.5 XLPE dielektrik kayıp faktörü (Nem 1. hafta yaşlandırma sonuçları) .. 71
Şekil 4.6 XLPE kayıp güç (Nem 1. hafta yaşlandırma sonuçları) 71
Şekil 4.7 XLPE dielektrik kayıp faktörü (Termal 2. hafta yaşlandırma sonuçları) 72
Şekil 4.8 XLPE kayıp güç (Termal 2. hafta yaşlandırma sonuçları) 72
Şekil 4.9 XLPE dielektrik kayıp faktörü (Nem 2. hafta yaşlandırma sonuçları) .. 73
Şekil 4.10 XLPE kayıp güç (Nem 2. hafta yaşlandırma sonuçları) 73
Şekil 4.11 XLPE dielektrik kayıp faktörü (Termal 3. hafta yaşlandırma sonuçları) 74
Şekil 4.12 XLPE kayıp güç (Termal 3. hafta yaşlandırma sonuçları) 74
Şekil 4.13 XLPE dielektrik kayıp faktörü (Nem 3. hafta yaşlandırma sonuçları) 75
Şekil 4.14 XLPE kayıp güç (Nem 3. hafta yaşlandırma sonuçları) 75
Şekil 4.15 XLPE dielektrik kayıp faktörü (Termal 4. hafta yaşlandırma sonuçları) 76
Şekil 4.16 XLPE kayıp güç (Termal 4. hafta yaşlandırma sonuçları) 76
Şekil 4.17 XLPE dielektrik kayıp faktörü (Nem 4. hafta yaşlandırma sonuçları) 77
Şekil 4.18 XLPE kayıp güç (Nem 4. hafta yaşlandırma sonuçları) 77
Şekil 4.19 XLPE dielektrik kayıp faktörü (Termal 5. hafta yaşlandırma sonuçları) 78
Şekil 4.20 XLPE kayıp güç (Termal 5. hafta yaşlandırma sonuçları) 78
Şekil 4.21 XLPE dielektrik kayıp faktörü (Nem 5. hafta yaşlandırma sonuçları) 79
Şekil 4.22 XLPE kayıp güç (Nem 5. hafta yaşlandırma sonuçları) 79
Şekil 4.23 XLPE dielektrik kayıp faktörü (Termal 6. hafta yaşlandırma sonuçları) 80
Şekil 4.24 XLPE kayıp güç (Termal 6. hafta yaşlandırma sonuçları) 80
Şekil 4.25 XLPE dielektrik kayıp faktörü (Nem 6. hafta yaşlandırma sonuçları) 81
Şekil 4.26 XLPE kayıp güç (Nem 6. hafta yaşlandırma sonuçları) 81
Şekil 4.27 LDPE yaşlandırma öncesi dielektrik kayıp faktörü 82
Şekil 4.28 LDPE yaşlandırma öncesi kayıp güç 83

Şekil 4.29 LDPE dielektrik kayıp faktörü (Termal 1. hafta yaşlandırma sonuçları) 83
Şekil 4.30 LDPE kayıp güç (Termal 1. hafta yaşlandırma sonuçları) 84
Şekil 4.31 LDPE dielektrik kayıp faktörü (Nem 1. hafta yaşlandırma sonuçları) 84
Şekil 4.32 LDPE kayıp güç (Nem 1. hafta yaşlandırma sonuçları) 85
Şekil 4.33 LDPE dielektrik kayıp faktörü (Termal 2. hafta yaşlandırma sonuçları) 85
Şekil 4.34 LDPE kayıp güç (Termal 2. hafta yaşlandırma sonuçları) 86
Şekil 4.35 LDPE dielektrik kayıp faktörü (Nem 2. hafta yaşlandırma sonuçları) 86
Şekil 4.36 LDPE kayıp güç (Nem 2. hafta yaşlandırma sonuçları) 87
Şekil 4.37 LDPE dielektrik kayıp faktörü (Termal 3. hafta yaşlandırma sonuçları) 87
Şekil 4.38 LDPE kayıp güç (Termal 3. hafta yaşlandırma sonuçları) 88
Şekil 4.39 LDPE dielektrik kayıp faktörü (Nem 3. hafta yaşlandırma sonuçları) 88
Şekil 4.40 LDPE kayıp güç (Nem 3. hafta yaşlandırma sonuçları) 89
Şekil 4.41 LDPE dielektrik kayıp faktörü (Termal 4. hafta yaşlandırma sonuçları) 89
Şekil 4.42 LDPE kayıp güç (Termal 4. hafta yaşlandırma sonuçları) 90
Şekil 4.43 LDPE dielektrik kayıp faktörü (Nem 4. hafta yaşlandırma sonuçları) 90
Şekil 4.44 LDPE kayıp güç (Nem 4. hafta yaşlandırma sonuçları) 91
Şekil 4.45 LDPE dielektrik kayıp faktörü (Termal 5. hafta yaşlandırma sonuçları) 91
Şekil 4.46 LDPE kayıp güç (Termal 5. hafta yaşlandırma sonuçları) 92
Şekil 4.47 LDPE dielektrik kayıp faktörü (Nem 5. hafta yaşlandırma sonuçları) 92
Şekil 4.48 LDPE kayıp güç (Nem 5. hafta yaşlandırma sonuçları) 93
Şekil 4.49 LDPE dielektrik kayıp faktörü (Termal 6. hafta yaşlandırma sonuçları) 93
Şekil 4.50 LDPE kayıp güç (Termal 6. hafta yaşlandırma sonuçları) 94
Şekil 4.51 LDPE dielektrik kayıp faktörü (Nem 6. hafta yaşlandırma sonuçları) 94
Şekil 4.52 LDPE kayıp güç (Nem 6. hafta yaşlandırma sonuçları) 95
Şekil 4.53 HFFR yaşlandırma öncesi dielektrik kayıp faktörü 95
Şekil 4.54 HFFR yaşlandırma öncesi kayıp güç 96
Şekil 4.55 HFFR dielektrik kayıp faktörü (Termal 1. hafta yaşlandırma sonuçları) 97

Şekil 4.56 HFFR kayıp güç (Termal 1. hafta yaşlandırma sonuçları) 97
Şekil 4.57 HFFR dielektrik kayıp faktörü (Nem 1. hafta yaşlandırma sonuçları) 98
Şekil 4.58 HFFR kayıp güç (Nem 1. hafta yaşlandırma sonuçları) 98
Şekil 4.59 HFFR dielektrik kayıp faktörü (Termal 2. hafta yaşlandırma sonuçları) 99
Şekil 4.60 HFFR kayıp güç (Termal 2. hafta yaşlandırma sonuçları) 99
Şekil 4.61 HFFR dielektrik kayıp faktörü (Nem 2. hafta yaşlandırma sonuçları) 100
Şekil 4.62 HFFR kayıp güç (Nem 2. hafta yaşlandırma sonuçları) 100
Şekil 4.63 HFFR dielektrik kayıp faktörü (Termal 3. hafta yaşlandırma sonuçları) 101
Şekil 4.64 HFFR kayıp güç (Termal 3. hafta yaşlandırma sonuçları) 101
Şekil 4.65 HFFR dielektrik kayıp faktörü (Nem 3. hafta yaşlandırma sonuçları) 102
Şekil 4.66 HFFR kayıp güç (Nem 3. hafta yaşlandırma sonuçları) 102
Şekil 4.67 HFFR dielektrik kayıp faktörü (Termal 4. hafta yaşlandırma sonuçları) 103
Şekil 4.68 HFFR kayıp güç (Termal 4. hafta yaşlandırma sonuçları) 103
Şekil 4.69 HFFR dielektrik kayıp faktörü (Nem 4. hafta yaşlandırma sonuçları) 104
Şekil 4.70 HFFR kayıp güç (Nem 4. hafta yaşlandırma sonuçları) 104
Şekil 4.71 HFFR dielektrik kayıp faktörü (Termal 5. hafta yaşlandırma sonuçları) 105
Şekil 4.72 HFFR kayıp güç (Termal 5. hafta yaşlandırma sonuçları) 105
Şekil 4.73 HFFR dielektrik kayıp faktörü (Nem 5. hafta yaşlandırma sonuçları) 106
Şekil 4.74 HFFR kayıp güç (Nem 5. hafta yaşlandırma sonuçları) 106
Şekil 4.75 HFFR dielektrik kayıp faktörü (Termal 6. hafta yaşlandırma sonuçları) 107
Şekil 4.76 HFFR kayıp güç (Termal 6. hafta yaşlandırma sonuçları) 107
Şekil 4.77 HFFR dielektrik kayıp faktörü (Nem 6. hafta yaşlandırma sonuçları) 108
Şekil 4.78 HFFR kayıp güç (Nem 6. hafta yaşlandırma sonuçları) 108
Şekil 4.79 XLPE yaşlanma öncesi çekme dayanımı 109
Şekil 4.80 XLPE termal yaşlandırma 3.hafta çekme dayanımı 110
Şekil 4.81 XLPE nem yaşlanması 3.hafta çekme dayanımı 111
Şekil 4.82 XLPE termal yaşlandırma 6.hafta çekme dayanımı 112

Şekil 4.83 XLPE nem yaşlanması 6.hafta çekme dayanımı 113
Şekil 4.84 LDPE yaşlanma öncesi çekme dayanımı 114
Şekil 4.85 LDPE termal yaşlandırma 3.hafta çekme dayanımı 115
Şekil 4.86 LDPE nem yaşlanması 3.hafta çekme dayanımı 116
Şekil 4.87 LDPE termal yaşlandırma 6.hafta çekme dayanımı 116
Şekil 4.88 LDPE nem yaşlanması 6.hafta çekme dayanımı 117
Şekil 4.85 HFFR yaşlanma öncesi çekme dayanımı 118
Şekil 4.80 HFFR termal yaşlandırma 3.hafta çekme dayanımı 119
Şekil 4.81 HFFR nem yaşlanması 3.hafta çekme dayanımı 120
Şekil 4.82 HFFR termal yaşlandırma 6.hafta çekme dayanımı 120
Şekil 4.83 HFFR nem yaşlanması 6.hafta çekme dayanımı 121

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Polimer özelliklerinin seramik ve metalik malzemelerle karşılaştırması 12
Tablo 2.2 Termoplastiklerin Karşılaştırmalı Özellikleri 17
Tablo 2.3 Çeşitli dolgu maddeleri 18
Tablo 2.4 Polietilenin elektriksel özellikleri 24
Tablo 2.5 LDPE'nin elektriksel özellikleri 25
Tablo 2.6 Polivinil Klorür elektriksel özellikleri 30
Tablo 2.7 Bazı termoplastiklerin polimerizasyon yöntemleri 35
Tablo 2.8 XLPE çapraz bağlama metodları 39
Tablo 4.1 XLPE yaşlanma öncesi uzama miktarı ve çekme dayanımı 110
Tablo 4.2 XLPE termal yaşlanma 3.hafta uzama miktarı ve çekme dayanımı 110
Tablo 4.3 XLPE nem yaşlanması 3.hafta uzama miktarı ve çekme dayanımı 111
Tablo 4.4 XLPE termal yaşlanma 6.hafta uzama miktarı ve çekme dayanımı 112
Tablo 4.5 XLPE nem yaşlanması 6.hafta uzama miktarı ve çekme dayanımı 113
Tablo 4.6 LDPE yaşlanma öncesi uzama miktarı ve çekme dayanımı 114
Tablo 4.7 LDPE termal yaşlanma 3.hafta uzama miktarı ve çekme dayanımı 115
Tablo 4.8 LDPE nem yaşlanması 3.hafta uzama miktarı ve çekme dayanımı 116
Tablo 4.9 LDPE termal yaşlanma 6.hafta uzama miktarı ve çekme dayanımı 117
Tablo 4.10 LDPE nem yaşlanması 6.hafta uzama miktarı ve çekme dayanımı 117
Tablo 4.11 HFFR yaşlanma öncesi uzama miktarı ve çekme dayanımı 118
Tablo 4.12 XLPE termal yaşlanma 3.hafta uzama miktarı ve çekme dayanımı 119
Tablo 4.13 XLPE nem yaşlanması 3.hafta uzama miktarı ve çekme dayanımı 120
Tablo 4.14 XLPE termal yaşlanma 6.hafta uzama miktarı ve çekme dayanımı 121
Tablo 4.15 XLPE nem yaşlanması 6.hafta uzama miktarı ve çekme dayanımı 121
Tablo 4.16 LDPE ve HFFR yaşlanma öncesi ve 3.hafta sonrası delinme gerilimleri (kV) 122
Tablo 4.17 LDPE ve HFFR 6.hafta sonrası delinme gerilimleri (kV) 123

ÖZET

Orta Gerilim Kablo İzolasyon Malzemelerinin Performans Faktörlerinin İncelenmesi

Yusuf Can GÖKTAŞ

Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Elektrik Tesisleri Programı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ramazan AYAZ

Eş-Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Celal Fadıl KUMRU

Gelişen teknoloji ve büyüyen nüfusla beraber her geçen gün enerji ihtiyacımız ve enerjiye olan bağımlılığımız artmaktadır. Bununla beraber güç sistemleri gelişmekte ve alternatif enerji sistemleri şebekeye entegre olmakta ve oluşan enerji talebini karşılamaya çalışmaktadır. Bu yüzden bu sistemler giderek daha karmaşık hale gelmekte ve enerjinin kaliteli aynı zamanda sağlıklı bir şekilde herhangi bir arızaya veya kesintiye uğramadan son kullanıcıya ulaşması büyük önem arz etmektedir. Bu bağlamda kablolarda kullanılan izolasyon malzemelerinin iyi tasarlanması ve boyutlandırılması gerekmektedir.

Teze konu malzemeler güç sistemlerindeki birçok farklı elemanda (Kablolar, trafolar, izolatörler vb.) kullanılmakta ve sıcaklık, nem, fiziksel stres, elektriksel darbeler gibi birçok farklı zorlayıcı etkiye maruz kalmaktadır. Bu etkilerin sonucunda elektriksel, fiziksel ve kimyasal özellikleri değişmekte ve çeşitli problemlere (Elektrik kesintileri, arızalar, yangınlar vb.) neden olmaktadır. Bunlarının önüne geçebilmek için bu malzemelerin dielektrik özellikleri farklı çalışma koşullarında incelenmesi ve performans değerleri araştırılması önemli hale gelmiştir.

Yapılan tez çalışmasında özellikle OG kablolarda çok sık kullanılan çapraz bağlı polietilen (XLPE), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) ve alev geciktirici

halojensiz termoplastik (HFFR) malzemelerin delinme gerilimi, tan delta ölçümleri, güç kayıplarına ilişkin deneyler yapılmıştır.

Henüz OG kablo izolasyonunda HFFR malzemelerin kullanımını göremiyor olsak da elektriksel özelliklerini ve bunların bir OG kablosunun işletme koşullarında karşılaştığı fiziksel zorluklara nasıl tepki vereceğini görmek adına HFFR bir malzemenin de test edilmesi istenmiştir. HFFR malzemeler yandığında açığa zehirli gaz çıkarmaması ve alev geciktirici özelliğinden dolayı AG kablolarda hızla kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bu yüzden incelenmesinin bilimsel açıdan fayda sağlayacağı düşünülmüştür.

Teze konu yalıtkan malzemelerin delinme dayanımı çok yüksek olsa da bu tip bir delinme tersinmez bir etki oluşturmaktadır. Bunun anlamı yalıtkanların elektriksel özelliklerindeki değişim geri döndürülemeyecek seviyededir. Aynı zamanda nem ve sıcaklığın etkisiyle beraber değişen dielektriksel özellikler de eski haline gelmemektedir.

İki farklı gruba ayrılmış numunelerden 1. Grup 100 °C sıcaklıkta yaşlandırılmış ve 7 günde bir olacak şekilde ölçümler alınmış, 2. Grup ise 45 °C sıcaklıkta ve %85 nem oranına ayarlanmış nem kabininde yaşlandırılmış ve her 7 günde bir olacak şekilde ölçümler alınmıştır. Fiziksel dayanıklılığı ölçmek adına EN 60811-501 standartına göre numune alınarak her gruba yaşlandırmanın başında, ortasında (3.Hafta) ve sonunda (6.Hafta) çekme kopma testleri yapılmıştır. Elektriksel ölçüm olarak her gruba 7 günde bir olacak şekilde tan delta ve kayıp güç ölçümü yapılmıştır. Delinme gerilimi deneyin başında herhangi bir yaşlandırma etkisine maruz kalmamış numunelere, yaşlandırmanın 3. haftasındaki numunelere ve yaşlandırmanın 6. haftasındaki numunelere uygulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kablo izolasyon performansı, termal yaşlandırma, tan delta, nem etkisi

ABSTRACT

Investigation of Performance Factors of Medium Voltage Cable Insulation Materials

Yusuf Can GÖKTAŞ

Department of Electrical Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Ass. Prof. Dr. Ramazan AYAZ

Co-supervisor: Assoc. Prof. Dr. Celal Fadıl KUMRU

Our energy needs and reliance on energy are expanding daily due to population gr owth and evolving technology. In addition, power systems are developing, and alternative energy systems are being integrated into the grid and are trying to meet the energy demand. Therefore, these systems are becoming more and more complex, and it is of great importance that the energy reaches the end user in a quality and healthy manner without any failure or interruption. In this context, the insulation materials used in cables must be well designed and sized.

The materials in this thesis are used in many different elements in power systems (cables, transformers, insulators, etc.) and are exposed to many different challenging effects such as temperature, humidity, physical stress, electrical impulses. As a result of these effects, their electrical, physical and chemical properties change and cause various problems (power outages, malfunctions, fires, etc.). To prevent these, it has become important to examine the dielectric properties of these materials under different operating conditions and to investigate their performance values.

In the thesis study, experiments were conducted on the breakdown voltage, tan delta measurements and power losses of cross-linked polyethylene (XLPE), low density polyethylene (LDPE) and flame-retardant halogen-free thermoplastic (HFFR) materials, which are frequently used in MV cables.

Although we have not seen the use of HFFR materials in MV cable insulation, we wanted to test a HFFR material in order to see their electrical properties and how they would respond to the physical difficulties encountered by a MV cable under operating conditions. HFFR materials are becoming increasingly popular due to their flame retardancy and not releasing toxic gas when burned. Therefore, it is possible that their examination will be scientifically beneficial.

Although the insulation materials in thesis have a very high breakdown strength, this type of breakdown creates an irreversible effect. In other words, the dielectric properties of the material change irreversibly. At the same time, the dielectric properties that change with the effects of humidity and temperature do not return to their previous state.

Samples are divided into two different groups, Group 1 was aged at 100 °C and measurements were taken every 7 days, while Group 2 was aged in a humidity chamber set at 45 °C and 85% humidity and measurements were taken every 7 days. In order to measure physical durability, samples were taken according to the EN 60811-501 standard and tensile strength tests were performed on each group at the beginning, middle (3rd week) and end (6th week) of aging. Tan delta and loss power measurements were performed on each group as electrical measurements every 7 days. Breakdown voltage was tested only on samples that were not exposed to any aging effect at the beginning of the experiment, in the middle (3rd week) and at the end (6th week).

Keywords: Cable insulation performance, thermal aging, tan delta, humidity effect

1
GİRİŞ

Enerji günümüz dünyasının en temel bileşenlerinden biri haline gelmiştir. Sanayi devriminden bu yana teknolojinin hızlı gelişimiyle beraber insanlık giderek daha çok enerjiye ihtiyaç duymakta ve bununla beraber enerji üretim, iletim ve dağıtımında negatif etkisi bulunan faktörleri azaltmaya ve yok etmeye çalışmaktadır. Günümüzde enerji iletiminde kullanılan en önemli elemanlardan biri de şüphesiz kablolardır. Özellikle şehirleşmenin ve sanayileşmenin artması, yenilebilir enerji sistemlerinin yaygınlaşması ve şebekeye entegre olması ve güç sistemleri elemanlarının giderek daha zor işletme şartlarına maruz kalmasıyla kabloların güvenilir ve sağlıklı bir şekilde vazifesini yerine getirmesi daha da büyük önem arz etmeye başlamıştır [1], [2].

Bu bağlamda kullandığımız kabloların sağlıklı bir şekilde görevini yapabilmesi için ihtiva ettiği malzemelerin farklı iklim, çevre ve coğrafi koşullarda yapısını koruması ve iletime devam etmesini sağlamak elzemdir. Özellikle yeraltı OG kablolarının yerleşim yerleriyle iç içe olması ve sıklıkla arızalarla karşılaşılması bu kabloların yapısal özelliklerini koruması için özellikle üzerinde çalışılmasını gerektiriyor. Bu sebeple günümüzde hala kullanılan XLPE, TR-XLPE ve HFFR gibi yalıtkanlar geliştirilmiş ve hala kullanılmaya devam etmedir. Bu yalıtkan malzemeler alternatif yüksek gerilime veya darbe gerilimine maruz kaldığında kimyasal bağları zayıflamakta ve son noktada arızaya sebep olmaktadır [3].

Literatür araştırması yapılırken kablolarda kullanılan koruyucu katmanların maruz kaldığı su, nem, yüksek sıcaklık, fiziksel stres gibi konuları araştırdım ve kablo performansını etkileyen 2 temel faktör olan nem ve termal etkinin etkisini ölçmek adına deney ve uygulamalar gerçekleştirildi.

1.1 Literatür Özeti

Literatür araştırmasını yaparken araştırmalarımı daha çok kabloların maruz kaldığı nem, sıcaklık, darbe gerilimi sonucu değişen tan delta değeri, kayıp güç, delinme gerilimi ve çekme kopma dayanımı üzerine yoğunlaşılmıştır. Çalışmada yaşlandırma ve nem faktörü çalışma koşullarında ve hatta çalışma koşullarından daha zorlu koşullarda denenmiş ve fiziksel, elektriksel değerler periyodik aralıklarla takip edilmiştir.

Orta gerilim (OG) kablolarda kullanılan izolasyon malzemelerinin dielektrik özelliklerini etkileyen birçok faktör bulunmaktır, Bunları ısıl yaşlanma, kimyasal bozunma, fiziksel stres, nem, su ağaçlanması ve elektriksel zorlanma olarak sıralayabiliriz [4], [5], [6]. S. V. Nikolajevic sıcaklık ve elektriksel strese karşı çapraz bağlı polietilen (XLPE) kablolardaki bozulmayı, arıza gerilimlerini ve tan delta değerlerini incelemiş ve kablo performansına etki eden temel faktörlerden bazılarını ortaya koymuştur [7]. Sıcaklıkla beraber çapraz bağlama yöntemlerinin de kablo izolasyonlarının üzerinde etkili olduğu Thomas Andritsch ve arkadaşları tarafından gösterilmiştir [8]. S.V. Nikolajevic ve D.D. Kostoski XLPE ve su ağaçlanması geciktiricili çapraz bağlı polietilen (TR-XLPE) numunelerini suyun içinde kablo uçlarını kapatarak ve açık bırakarak nem ve suyun kablo performansı üzerindeki negatif etkisini göstermişlerdir [9]. Güç sistemleri düşünüldüğünde orta gerilim yeraltı kablolarının yerleşim yerlerine çok yakın ve hatta iç içe olmasından dolayı orta gerilim kablolarında kullanılan komponentler üzerine çalışmanın önemi D. Peng, R.N. Hampton ve arkadaşları tarafından ortaya koyulmuştur [10][11]. Harmonikler de güç sistemlerinin temel sorunlarından biridir, Mohammed Hassan ve arkadaşları güç sistemlerinde bulunan harmonik bileşenleri simüle ederek bunların kablo yalıtkanları üzerindeki etkileri göstermiştir [12]. Neha Adhikari 6.35/11 kV çapraz bağlı polietilen (XLPE) bir güç kaynağı ve trafoyla kabloyu yüksek gerilime ve yüksek sıcaklığa maruz bırakıp tan delta değerlerini ölçmüş ve kablo performansındaki değişimleri ortaya koymuştur [13]. Nemin kablo üzerindeki etkisini ölçmek adına Takanori Yamaguchi ve arkadaşları su ağaçlanması olan ve olmayan numunelerde elektriksel ağaçlanma başlangıç gerilimini ölçmüş ve elektriksel alan rahatlamasını ortaya koymuşlardır. Bu deneylerde su ağaçlanması olan numunelerde, ağaçlanma başlangıç geriliminin su

ağaçlanması olmayan numunelerden daha yüksek olabildiğini ortaya koymuş ve bunu elektrik alan rahatlamasıyla bağdaştırmışlardır [14].

Y. Hayashi ve arkadaşları sıcaklığın kablo izolasyon malzemesi üzerindeki etkisini oda sıcaklığında ve 70 °C'de deneyler yapmışlar. Su ağaçlanması bulunan kablolara farklı gerilimler uygulayıp elektriksel ağaçlanma gerilimlerini ve elektriksel ağaçlanmanın boyutunu gözlemlemişlerdir. Çalışma sıcaklığında elektriksel ağaçlanmanın çok daha hızlı büyüdüğü ve bu malzemenin çok daha kısa bir süre içerisinde arıza durumuna geçeceğini göstermişlerdir [15]. Delinme dayanımıyla ilgili Zenjebil Jouini ve arkadaşlarının yapmış olduğu deneyde 635 µm kalınlığında alüminyum oksit (Al2O3) plakalar kullanılmış ve farklı seviyelerde basınç uygulanan malzemenin bükülme ve eğilmeyle beraber delinme geriliminin düşüşü gösterilmiştir [16]. Kablo malzemelerinde elektriksel özellikler kadar fiziksel dayanım da önemlidir, özellikle enerji talebinin artmasıyla beraber OG yeraltı kabloları giderek çok daha yüksek miktarda enerjiyi taşımak durumunda kalacak ve bu da izolasyonun elektriksel olduğu kadar fiziksel olarak da stabil kalmasını zorunlu hale getirecektir. Günümüzde çapraz bağlı polietilen (XLPE) malzemelere farklı miktarlarda dikümil peroksit (DCP) eklenerek farklı XLPE çeşitli üretilmektedir. Hongjian Liu ve arkadaşları bunların termal uzamaya etkisini test etmek adına IEC 60811 standardına göre 200 ± 3 ◦ C'de termal-oksidatif yaşlandırmayla beraber kablo performansını ölçmek için numuneler alarak termal uzamalarını test etmiştir. Antioksidanların termal uzamaya pozitif etkisini ortaya koymuştur [17]. Etilen propilen kauçuk (XLEPR) ve çapraz bağlı polietilen (XLPE) üzerinde termal-oksidatif yaşlandırma yapan Camille Blivet ve arkadaşları yaşlandırılmış malzemenin karakterizasyonunu Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR), jel fraksiyonu, diferansiyel taramalı kalorimetre ve çekme testleri kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Klasik Arrhenius metodolojisi kullanılarak, XLPE ve XLEPR'nin aktivasyon enerjileri 200 µm kalınlığındaki filmler üzerindeki spektroskopik ölçümlerden ve 1 mm kalınlığındaki numuneler üzerindeki çekme testi sonuçlarından 70–160 °C sıcaklık aralığında hesaplanmıştır: ortalama değerler XLPE için 103 kJ mol-1 ve XLEPR için 102 kJ mol-1 bulunmuştur [18]. Nükleer enerjinin hayatımıza girmesiyle en büyük enerji kaynaklarından biri haline gelmiştir, hatta bazı uçak gemilerinin nükleer enerjiyle çalıştığını düşündüğümüzde bu enerjinin giderek yaygınlaşması söz konusu

diyebiliriz. Bu bağlamda nükleer enerjiden elektrik üretiminde yine bu enerji kablolarla taşınmaktadır. Liu Shuaishuai'yle arkadaşları XLPE üzerinde denemeler yapmış, radyasyon ve yüksek sıcaklığın etkisiyle XLPE'deki oksitlenme seviyelerini ve buna bağlı yalıtkanın dielektriksel değişimlerini sayısal verilerle ortaya koymuştur. XLPE 0, 120, 300 ve 540 Gy/h gama radyasyonuna maruz kalma doz oranlarıyla 15 gün boyunca 60, 90 ve 115 °C'de yaşlandırılmış ve %7-%93 arasında oksidan miktarında azalma gözlemlenmiştir [19]. Dielektrik kayıp faktörünü (tan delta) ölçmek adına kullanılan yöntemlerden biri de çok düşük frekanslarda (VLF) ölçüm yapmaktır. Hernandez Mejia ve arkadaşları bu yöntemi kullanarak dielektrik kayıp faktöre ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Ölçümler 0.001 Hz – 1 Hz arasında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada 40 yıldır hizmette bulunan kılıfsız 15 kV anma gerilimi olan XLPE numuneler kullanılmış ve çok düşük frekansta adım dayanım testleri yapılmıştır. Makale ayrıca belirli bir test gerilim seviyesi için tan delta ölçümlerindeki saçılmayı hesaba katan yeni bir ek teşhis özelliğinin kullanımını da önermektedir [20] [21] [22]. HFFR malzemeler OG kablolardan çok AG kabloların yapısında kullanılmaktadır. Daha çok iç tesisat kablolarında olası bir yangın anında çıkışları görebilmek, insan zehirlenmesini önlemek gibi amaçlarla üretilmiş termoplastik malzemedir. Jeremy Seguillon ve arkadaşları 6 m uzunluğunda 3 farklı kablo kanalını hava akımının olduğu bir koridora yerleştirip termoset ve termoplastik malzemelerin yangın ısı salınımı hızını ölçmüşlerdir [23]. Bir diğer çalışma su ağaçlanması nedeniyle dielektrik özellikleri bozulmuş bir XLPE'nin nano akışkan enjeksiyonu yöntemiyle eski haline getirilmesiyle ilgili yapılmıştır. Kai Zhou ve arkadaşları enjeksiyon için tetraetil ortosilikat (TEOS) kullanmışlar ve işlem sonrası taramalı elektron mikroskobuyla (SEM) morfolojik değişimler analiz edilmiştir. Ayrıca moleküler değişimler FTIR spektroskopisiyle incelenip ortaya konmuştur. Deney sonucunda iyileştirilmiş numunelerin tan delta değerlerinin, hiç yaşlanmamış numunelerden daha iyi olduğu görülmüştür [24]. Gyögy Banhegyi'nin yapmış olduğu çalışmada yüksek gerilim doğru akım (HVDC) kablolarda en çok kullanılan XLPE yerine termoplastik malzemelerin kullanılması tartışılmış. Düşük ve yüksek yoğunluklu polietilen malzemeler bir araya getirilerek polipropilenle karıştırılarak daha kararlı ve ısıya karşı direnci artırılmış bir termoplastik üretmeye çalışılmıştır. Termoplastik malzemenin termal kararlılığı dışındaki faktörlerde XLPE yerine kullanılabileceğine dair incelemeler yapılmıştır. Temel olarak yüksek gerilim

kablolarında geri dönüştürülebilir (termoplastik) malzemelerin kullanılabilmesine yönelik çalışma yapılmıştır [25]. Cihat Çağdaş Uydur, Oktay Arıkan ve arkadaşları, OG dağıtım sistemde giderek artan güç talebi ve yük-talep dengesizliğinin kablo yalıtkanlara etkisini anlamak için 12/20 kV bir XLPE kabloya 60 kV aşırı gerilim uygulayarak yaşlandırmıştır. 80 yaşlandırma döngüsü uyguladıktan sonra tan delta (tan δ) ve dielektrik kayıpları (Pk) ölçmüşlerdir. Dielektrik kayıp gücün ve dielektrik kayıp faktörünün %32 arttığını ortaya koymuştur [26]. Sichen Kin ve arkadaşları 110 kV XLPE kablo üzerinde hizmet yıllarına göre optimum akımdayken sıcaklık artışlarını ve dielektrik kayıpları ölçmüşlerdir. Daha sonra ölçümler hiç yaşlandırılmamış numunelerle karşılaştırılmıştır. 15 ve 30 yıllık servis süresindeki kabloların sıcaklık artışları hiç hizmete girmemiş ve yaşlandırılmamış bir kabloya göre sırasıyla %111,15 ve %117,4 oranında daha yüksektir. Dielektrik kayıplar yüzünden ısınma oranı 0, 15 ve 30 yıllık numuneler için sırasıyla %2,77, %25,45 ve %34,78 bulunmuştur [27]. Aynı araştırmada, kablo çekirdeği sıcaklığının normalden %8 daha fazla olması durumunda kablo ömrünün yarıya ineceğine, sıcaklık %15'i aşarsa kablo ömrünün nominal ömrün %25'i olacağı belirtilmiştir [28][29]. Oktay Arıkan, Cihat Çağdaş Uydur ve Celal Fadıl Kumru, 50 aşırı gerilim ve darbe gerilimi döngüsüyle 12/20.8 kV bir XLPE kabloyu yaşlandırmış. Ardından kısmi deşarj ve dielektrik kayıp faktörü açısından kabloyu değerlendirmiştir. Çalışmada bu değerlendirme metotlarının hibrit bir şekilde uygulanması ve bunun kablo durumunu değerlendirme açısından daha doğru olacağı ortaya konmuştur [30]. Yang Yang ve arkadaşları tarafından dielektrik kayıpların online olarak izlenip kablo verilerinin anlık olarak alınabileceği bir sistem geliştirilmiş [31]. Yine Oktay Arıkan ve arkadaşları, 15'er dakikalık 80 döngü halinde bir OG kabloyu nominal geriliminin 5 katında yaşlandırmış. Daha sonra dielektriksel parametrelerini (Dielektrik kayıp faktörü, dielektrik kayıplar ve kapasite) şebeke frekansında ölçmüştür. Yapılan testlerin ardından elde edilen veriler çeşitli yöntemlerle değerlendirilmiştir. Değerlendirme yöntemi olarak eğri uydurma (CF), karar ağacı (DT), ve yapay sinir ağları (YSA) kullanılmıştır. Sonuç olarak bu yöntemlerin gerçek veriyi verme istatistikleri tartışılmış ve yapay sinir ağlarının içlerindeki en iyi yöntem olduğuna karar verilmiştir [32]. L. Hiu ve arkadaşları XLPE/silika nanokompozitlerin termal yaşlanması üzerine araştırmalar yapmış, 50 °C ve %100 nem oranına maruz bırakılan numunelerin nem difüzyonunu ve elektriksel mukavemeti ölçmüştür. Bu bağlamda LDPE

numunelerinin içine ekledikleri nano silikayla beraber 165 °C'de karıştırılıp ardından DCP eklenmiş ve kalıplarda 1.5mm kalınlıkta numuneler oluşturulmuştur. Suya daldırma ve kurutma döngülerinden sonra nanokompozit katılmış XLPE malzemenin ağırlık artışını yani sıvı difüzyonunu göstermiştir. Bu da kablo izolasyonunun direncini düşürmüş ve dielektrik kayıpları yükseltmiştir. 6 aylık yaşlandırma sonrası 2 farklı nanokompozitle oluşturulmuş XLPE'lerde ciddi bir geçirgenlik artışı gözlemlenmiştir [33].Y. Mecheri ve arkadaşlar 180 °C'de 300 bar altında %2 DCP içeriğiyle ürettikleri XLPE üzerinde nemin etkisini araştırmak adına 5600 saat süren bir deney yapmışlar ve yalıtkanı %100 bağıl neme maruz bırakmışlardır. Her 240 saate bir fırından 2 numuneyi çıkararak 7.5 cm yarıçapında plakalar oluşturmuşlar ve teste tabi tutmuşlardır ve yaşlanma etkisini ölçmek adına dielektrik parametrelere bakılmıştır. Bu bağlamda tan delta, izolasyon direnci, delinme gerilimi ve bağıl dielektrik sabiti (ε_r) incelenmiştir. Deneyler 20 – 140 °C'de yapılmış ve dielektrik sabitinin sıcaklıkla beraber düştüğü gözlemlenmiştir. Yaşlanmış numunelerde ise yaşlanmamış numunelere göre tan delta ve diğer değerler daha kötü sonuçlar vermiştir. Dielektrik kayıp faktörü OG kablonun çalışma sıcaklığı olan 90-100 °C'de çok fazla değişim göstermemiş ancak bundan daha yüksek sıcaklıklarda test edildiğinde ciddi farklar görülmüştür. Malzemelerin dirençlerinde ortalama 10 kat düşüş görülmüştür. Delinme dayanımları ise %40 mertebesinde düşüş göstermiştir [34]. M. A. Douar ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada çeşitli polimerlerin arıza voltajı incelenmiştir. Numunelere 100-130-150°C sıcaklıkta tuz sisiyle hidrotermal yaşlandırma yapılmıştır. Yaşlandırılan polimerlere (poliamid 6, poliamid 66, poliarilamid, polikarbonat, polietilen, polifenilen sülfür, doldurulmamış etilen propilen dien monomer ve aleve dayanıklı etilen propilen dien monomer.) yapılan delinme dayanımı testleri sonucunda delinme dayanımı 10/1 mertebesine düşmüştür [35]. Dabbak ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada, polipropilen (PP), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) dahil olmak üzere çeşitli polimer tipleri üzerindeki yüzey deşarjlarının etkisi araştırılmıştır. Farklı polimer tiplerinin tan delta ve kısmi deşarj özellikleri analiz edilmiştir. Weibull dağılımı kullanılarak delinme başlangıç gerilimi bulunmaya çalışılmıştır. Her polimer tipindeki PD özellikleri ile elektrik alan dağılımı arasındaki bağlantıyı çıkarmak için bir sonlu eleman modeli de geliştirilmiştir [36].

N. L. Dao ve arkadaşları LDPE, HDPE ve XLPE üzerinde yüksek gerilimin etkisini araştırmak adına yıldırım darbeleriyle malzemeleri yaşlandırmış ve daha sonra elektriksel özelliklerini ölçmüştür. Numuneleri yüksek ısıda kalıplara döküp kalıplarda baskılayarak üretmişlerdir. Yıldırım darbeleriyle 85 kV/mm'lik bir elektrik alan oluşturulmuştur. Ardından 3-6 bin yıldırım darbesi uygulanmıştır. HDPE'nin güven limiti yaşlanmamış numunelerin %10,3 ve %16 kadar altındaki değerlere kadar inmiştir. Ciddi bir değişim olmadığı ifade edilmiştir. LDPE için herhangi bir değişim söz konusu olmamıştır [37][38]. Minzun Ji ve arkadaşları XLPE'nin yaşlanma süreçleri üzerine çalışmış ve yaşlanma mekanizmasını açıklamıştır [39]. Çapraz bağlı polietilen (XLPE) yalıtım malzemesinin bozulması, kabloların güvenli bir şekilde çalışabilmesi açısından son derece önemlidir. XLPE'nin 130 °C veya daha düşük sıcaklıklarda termo-oksidatif yaşlanması üzerine pek çok detaylı çalışma yapılmış olsa da, maksimum aşırı yük iletken sıcaklığı ve kısa devre sıcaklıkları 200 °C'yi geçebilir ve bu gibi durumlarda yaşlanma süreçleri tam olarak çözümlenmemiştir. Hongkun Lv ve arkadaşları FTIR, DSC, çekme testleri, yoğunluk ölçümü ve jel fraksiyonu ölçümü gibi çeşitli tamamlayıcı teknikler kullanarak termal olarak yaşlandırılmış XLPE'nin mekanik ve fiziko-kimyasal özelliklerini analiz etmiştir. 150-160 ve 170 °C'de yapılan yapılan testlerde XLPE'nin yaşlanma mekanizmasını ortaya koyarak daha iyi bir kullanım ömür tahmini metodu ortaya koymaya çalışmıştır [40]. Abdulsalam S. Alghamdi ve Rayan K. Desuqi, Arrhenius modelini uygulayarak standartlaştırılmış bir hızlandırılmış termal yaşlanma yöntemi kullanmışlardır. Bu yaşlanma çeşidinde yalıtımın kullanım ömrünün sonuna geldiğinin kabul edileceği bir seviyeye kadar yaşlandırmaya devam edilmektedir. Bunu da çekme kopma testindeki uzama miktarının yaşlanmamış numunenin kopma anındaki uzamasının yarısına düşmesi olarak tanımlanmıştır. Nominal olarak XLPE ömrünün 40-60 yıl olduğu kabul edilse de deneylerde 7-30 yıl arasında sonuçlar elde edilmiştir [41].

1.2 Tezin Amacı

Kablo yalıtkanları özellikle de OG kablo yalıtkanları zorlu şartlar altında enerji iletim ve dağıtımında rol alan kabloları hem fiziksel hem de elektriksel etkilere karşı korumaktadır. Enerji talebinin ve arzının bu denli arttığı ve artmaya devam ettiği bu dönemde, özellikle elektrikli araçlar ve enerji depolama sistemlerinin de kullanımının artmasıyla, artık çok daha büyük enerjileri çok daha kısa sürelerde iletmek zorunlu hale gelmiştir. Bu yüzden kablo yalıtkanlarının önemi her geçen gün artmakta ve bu malzemelerin çalışma koşulları her geçen gün zorlaşmaktadır. Özellikle yüksek akım, aşırı gerilim, darbe gerilimi, nem, sıcaklık, fiziksel stres gibi faktörler düşünüldüğünde XLPE gibi dielektrik ve termal özellikleri çok iyi olan yalıtkanlar bile gelecekte geliştirilmeye muhtaçtır. Hatta farklı sentetik polimerlerin hayatımıza girmeye başlamasına şahit olacağımıza şüphe yoktur.

Bu çalışmada kabloların bu zorlayıcı etkilerinden ikisi olan "sıcaklık" ve "nem" kablo yalıtkan performansı değerlendirme faktörü olarak araştırılmış ve deneyler yapılmıştır. OG kablo yalıtkanlarının çalışma sıcaklığı 90 °C'dir. Bu yüzden termal yaşlandırma için fırınımızı 100 °C'ye ayarladık. Olası elektrik gidip gelmesi, fırının kapağının açılıp kapanması gibi sıcaklığı düşüren faktörleri göz önüne aldığımızda 100 °C sıcaklık yaklaşık olarak çalışma sıcaklığında yaşlandırılmış etkisi yaratacaktır. Ayrıca literatürde XLPE, LDPE gibi malzemeler 20°C'den 200°C'ye kadar farklı sıcaklıklarda yaşlandırılmış ve deneyler mevcuttur. Amacımız bu çalışmada çalışma sıcaklığı altında XLPE, LDPE ve HFFR malzeme üzerinde yaşlanma etkilerini gözlemlemektir.

Ayrıca bir grup numune %85 bağıl nem ve 45 °C sıcaklıkta bırakılmış ve numunelerde nem etkisi gözlemlenmeye çalışılmıştır. Performans değerlendirme metodu olarak dielektrik kayıp faktörü incelenmiş, belirli aralıklarla fırından 3'er adet numune alınıp çekme kopma, uzama, delinme gerilimi ve dielektrik kayıp faktörü ölçülmüştür.

Ölçümler 2 kV'den başlayarak 12 kV'ye kadar 2 kV aralıklarla ve 50 Hz'den başlayarak 400 Hz'e kadar 50 Hz artırarak yapılmıştır.

Delinme geriliminden elde edilen sonuçlar her bir numune için tablolarda gösterilmiştir. Çekme kopma testleriyse EN 60811-501 [42] standardına göre yapılmıştır. 2 tip çekme kopma numunesi tarif edilen standartta kısa tip numune

örneği alınmıştır. Tezde test edilen HFFR termoplastik malzeme AG kablolarda sıkça kullanılmakta ve her geçen gün kullanımı daha da artmaktadır. Bazı ülkelerde iç tesisat kablolarından kullanımı zorunlu hale getirilmiştir. Bu kablolar özellikle yangına karşı dayanıklı, alev iletimi yavaş ve yandığında zehirli gaz açığa çıkarmayan kablolardır. Ayrıca bazı termoplastiklerin HVDC hatlarda XLPE yerine kullanımı tartışılırken, [25] bir termoplastiğin ısı ve neme karşı performansını ölçmek tezimiz için deneysel bir çalışma olmuştur.

Elde edilen sonuçlar kablo yalıtkanlarının ömürlerini hesaplamada veri kaynağı olarak kullanılabilecektir. Ayrıca kablo tasarımı için referans niteliğinde bir çalışma olmuştur. Alternatif kablo materyallerinden birkaçı üzerine yeni çalışmalara ilham olmasını beklenmektedir.

1.3 Tezin Literatüre Katkıları

Tez çalışmasında kablo yalıtkanlarının dielektrik özellikleri ve fiziksel özellikleri çeşitli yaşlanma faktörlerinin etkisi altında incelenmiştir. Ölçümler periyodik olarak haftada bir defa olacak şekilde yapılmıştır. Isıl yaşlandırma için 100 °C'lik sıcaklık belirlenmiştir. XLPE için çalışma sıcaklığı olan 90-110 °C baz alınarak bu sıcaklık belirlenmiştir. Yöntem olarak tan delta, kayıp güç, yalıtkan direnci, delinme gerilimi ve çekme kopma kuvveti kullanılmıştır. Yapılan deneylerin literatüre katkıları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Ölçümler 2 kV'den 12 kV'a kadar 2 kV aralıklarla gerçekleştirilmiş ve farklı gerilim seviyelerinin izolasyon üstündeki etkileri ve değişimi gösterilmiştir. Aynı şekilde frekans 50 Hz'den 400 Hz'e kadar 50 Hz. aralıklarla artırılmış ve farklı frekansların tan delta, kayıp güç ve sığa üzerindeki değişimler ortaya konmuştur.
- Özellikle termoplastiklerin HVDC gibi orta ve yüksek gerilimde kullanımına ilişkin denemeler mevcuttur. Kullanılan HFFR termoplastik malzemenin ısı ve nem dayanımını göstermek, ilerdeki termoplastikle ilgili yapılacak çalışmalara yardımcı olacaktır.
- Çalışmada yaşlanmanın yalnızca dielektriksel değil aynı zamanda fiziksel etkisi araştırılmış ve buna dayalı çekme kopma testleri yapılmıştır. Kopma kuvveti ve uzama miktarları ortaya konmuştur.

- Kablo kullanım ömrü tahmin etmekte kullanılan farklı metodolojiler mevcuttur. Buradaki veriler yeni metodolojiler geliştirmede veri kaynağı olarak kullanılabilecektir.

Genel olarak 5 bölümden oluşan tez çalışmasının ilk bölümünde literatür araştırması, tezin amacı ve tezin literatüre katkıları bulunmaktadır.

2. kısımda kablo yalıtkanları üzerine genel bilgiler verilmiştir. Bu kısımdaki bilgiler araştırmacılar için de esin kaynağı olabilir. Nitekim tek bir XLPE çeşidi, tek bir HFFR malzeme bulunmamaktadır. Bunlar kullanılan katalizörlerin çeşitleri, karışıma eklenme oranları gibi faktörlerle bağlı olarak farklı bağlar oluşturmaktadır. LDPE gibi malzemelerde ise üretim sıcaklığı ve basınç gibi faktörler malzemenin yapısını ve elektriksel, fiziksel özelliklerini değiştirmektedir.

3. kısımda test düzeneği ve testlerin uygulanma metotları anlatılmaktadır. Daha çok görsellerle anlatılacak bu kısımda test düzeneğinin yapısı ve hangi uluslararası standartlara göre yapıldığı, kullanılan elektrotlar, fırın, nem kabini, ekstrüder gibi malzemelerin tanıtımı yapılmaktadır.

4. kısımda test sonuçları ve analizi yapılmaktadır. Burada ortaya çıkan verilerin ne ifade ettiği ve nasıl değiştiği tartışılmaktadır.

Son kısımda tezin tez çalışmasından çıkan sonuç verilmiş ve bilim adına bu sonuçların ne ifade ettiği belirtilmiştir.

2
KABLOLARDA KULLANILAN YALITKANLAR

2.1 Polimerler

Polimerleri anlamak ileriki bölümlerde bahsedilecek olan termoplastikler ve termosetleri anlamak için büyük önem arz ediyor. Bu yüzden polimerlere kısacak bir bakış atmak faydalı olacaktır. Tarihte polimerik malzemeler, tam olarak doğaları bilinmese de erken dönemlerden beri kullanılmaktadır. 1400'lerin sonlarında Kristof Kolomb, orta amerikada yerlilerinin ağaçlardan elde ettikleri malzemeyle yapılmış toplarla oynadığını gözlemlemişti. Bu malzeme, Charles Goodyear'ın kükürt ekleyerek özelliklerini büyük ölçüde iyileştirdiği doğal kauçuğun başlangıcıydı; ancak polimerik malzemelerin kullanımı, hala doğal bazlı materyallerle sınırlıydı. İlk gerçek sentetik polimerler, 1900'lerin başında fenol ve formaldehit kullanılarak reçineler, özellikle Baekeland'ın Bakelite'i oluşturulmuştu. Sentetik polimerlerin geliştirilmesine rağmen, bilim insanları bu malzemelerin doğasını hala tam anlamıyla çözmemişti. Uzun yıllar boyunca, bunların moleküllerin bir araya geldiği kolloidler olduğuna inanılıyordu. Ancak, Herman Staudinger, 1920'lerde polimerlerin dev moleküller ya da makromoleküller olduğunu gösterdi. 1928'de Carothers, doğrusal polyesterler ve poliamidler (günümüzde naylon olarak bilinir) geliştirdi. 1950'lerde, Ziegler ve Natta'nın anyonik koordinasyon katalizörleri üzerine yaptığı çalışmalar, polipropilen, yüksek yoğunluklu doğrusal polietilen ve diğer stereospesifik polimerlerin gelişimine öncülük etti. Daha yakın dönemde ise, stereospesifik polimerlerin hazırlanmasında Metalosen katalizörleri ve nanoteknoloji uygulamalarında polimerlerin kullanımı öne çıkmaktadır.

Malzemeler genellikle metal, seramik veya polimer olarak kategorize edilir. Polimerler, diğer malzemelerden farklı olarak genellikle daha düşük yoğunluk, termal iletkenlik ve modüller sergiler. Tablo 2.1, polimerlerin özelliklerini bazı tipik seramik ve metal malzemelerle karşılaştırmaktadır. Polimerlerin daha düşük yoğunlukları, hafif ağırlığın tercih edildiği uygulamalarda bir avantaj sağlar. Katkı maddelerinin kullanımı, bileşik üreticilerine belirli uygulamalar için çeşitli malzemeler geliştirme olanağı sunar. Örneğin, iletken dolgu maddelerinin eklenmesi, yalıtımdan iletkenliğe kadar geniş bir malzeme yelpazesi yaratır. Bu nedenle, polimerler EMI koruması ve antistatik özellikler gibi uygulamalarda kullanılır. Polimerik malzemeler, çok farklı ürünlerde yer bulur. Otomotiv sektöründe, iç parçalar ve motor bölmesi uygulamalarında kullanılırken, paketleme alanı, karbonatlı içecek şişelerinden plastik ambalajlara kadar geniş bir termoplastik yelpazesi sunar. Uygulama gereksinimleri büyük ölçüde değişiklik gösterse de, bu farklı hizmet koşullarını karşılamak için plastik malzemeler sentezlenebilir. Parça tasarımcısının işi, gereken talepleri karşılayacak uygun termoplastik malzeme seçmektir [43].

Tablo 2.1 Polimer özelliklerinin seramik ve metalik malzemelerle karşılaştırması

Materyal	Spesifik Kütle Oranı	Termal Geçirgenlik (°C cm^2 s)	Elektriksel Direnç (μΩ cm)	Young Modülü (MPa)
Alüminyum	2,7	2,2	2,9	70000
Pirinç	8,5	1,2	6,2	110000
Bakır	8,9	4	1,7	110000
Çelik (1040)	7,85	0,48	17,1	205000
Al2O3	3,8	0,29	$>10^{14}$	350000
Beton	2,4	0,01	-	14000
Boroksilat Cam	2,4	0,01	$>10^{17}$	70000
MgO	3,6	-	10^5 (2000°F)	205000
Polietilen (Yüksek Yoğunluklu)	0,96	0,0052	10^{14}-10^{18}	350-1250
Polistiren	1,05	0,0008	10^{18}	2800
Polimetil Metakrilat	1,2	0,002	10^{16}	3500
Naylon	1,15	0,0025	10^{14}	2800

2.1.1 Polimer Yapısı ve Sentezlenmesi

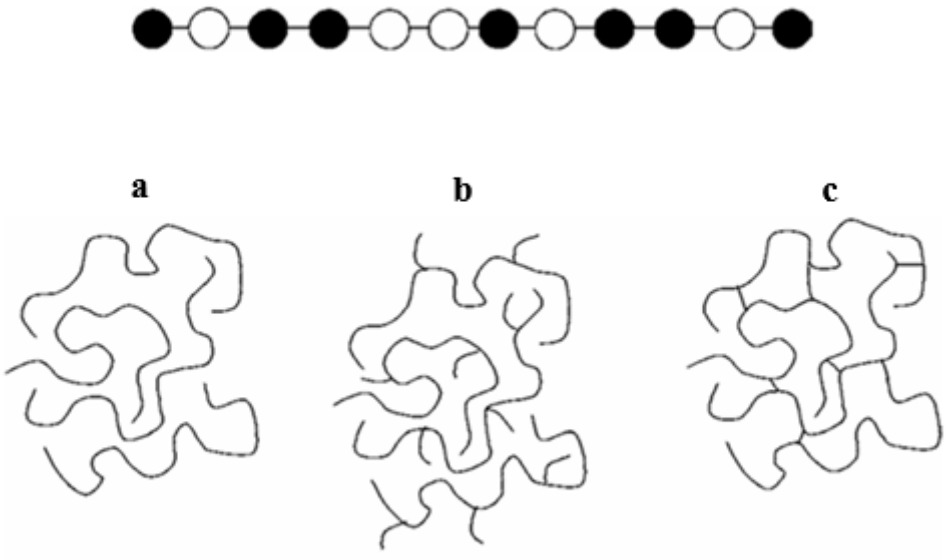
Polimelerlerin yapılarına ve sentezlenme şekilleri çeşitlilik göstermektedir. Bir polimer, düşük molekül ağırlıklı bir türü (monomer; örneğin etilen) son derece uzun bir zincire (polimer; etilen durumunda polimer polietilendir) dizerek hazırlanır, tıpkı bir kolye yapmak için bir dizi boncuğu bir araya dizmek gibi (bkz. Şekil 2.1).

Başlangıçtaki düşük molekül ağırlıklı bileşiklerin kimyasal özellikleri, nihai polimerin özelliklerini belirleyecektir. İki farklı düşük molekül ağırlıklı bileşik polimerize edildiğinde, elde edilen polimere kopolimer denir. Sitiren bütadien kauçuk bunun bir örneğidir. Bu durum Şekil 2.2'de gösterilmektedir. Plastikler ayrıca termoplastikler ve termosetler olarak da sınıflandırılabilir. Termoplastik malzeme, çapraz bağlı olmayan yüksek molekül ağırlıklı bir polimerdir ve doğrusal veya dallı bir yapıda olabilir. Isıtıldığında, termoplastikler yumuşar ve erir, böylece plastik işleme ekipmanları kullanılarak şekillendirilmeleri sağlanır. Bir termosetin tüm zincirleri üç boyutlu bir ağda kovalent bağlarla birbirine bağlanmıştır (çapraz bağlı). Termoset malzemeler çapraz bağlı olduklarında akmazlar, ancak termoplastik malzemeler uygun sıcaklığa ısıtıldığında yeniden işlenebilirler. Farklı yapı tipleri Şekil 1.3'te gösterilmiştir. Farklı polimerlerin özellikleri, birbirlerinden büyük ölçüde farklılık gösterebilir Belirli bir polimer için, özellikleri sadece malzemenin mikro yapısını değiştirerek değiştirmek de mümkündür [43].

$$n\ H_2C = CH_2 \rightarrow (\ CH_2 - CH_2\ )_n \qquad (2.1)$$



Şekil 2.1 Polimerizasyon [43]



Şekil 2.2 a) Doğrusal, b) dallanmış ve c) çapraz bağlı polimer yapıları [43]

İki temel polimerizasyon yaklaşımı vardır: basamaklı reaksiyon polimerizasyonu ve zincirleme reaksiyon polimerizasyonu.1 Basamaklı reaksiyonda (yoğunlaşma polimerizasyonu olarak da adlandırılır), reaksiyon iki çok işlevli monomer arasında meydana gelir ve genellikle su gibi küçük bir molekül açığa çıkar. Reaksiyon ilerledikçe daha uzun ve daha uzun gruplar birlikte reaksiyona girdikçe daha yüksek moleküler ağırlıklı türler üretilir. İki monomerin dimer oluşturmasına ek olarak bir dimer ve monomer de reaksiyona girip trimer yapılarını oluşturabilmektedir. Reaksiyonun gerçekleşme şekli (n) tane tane monomer ve (m) tane dimerin bir araya gelmesiyle (n+m) tane trimerin ortaya çıkması şekilde olmaktadır. Bu reaksiyonların sonucunda giderek yapıya daha çok monomer katılır ve sonunda oluşan polimerin ağırlığı giderek artar. Bu şekilde ağır polimelerin üzerildiği sistemlerde polimerin ana yapısında karbon dışında atomlar bulunur. Polyester buna örnek olarak verilebilir

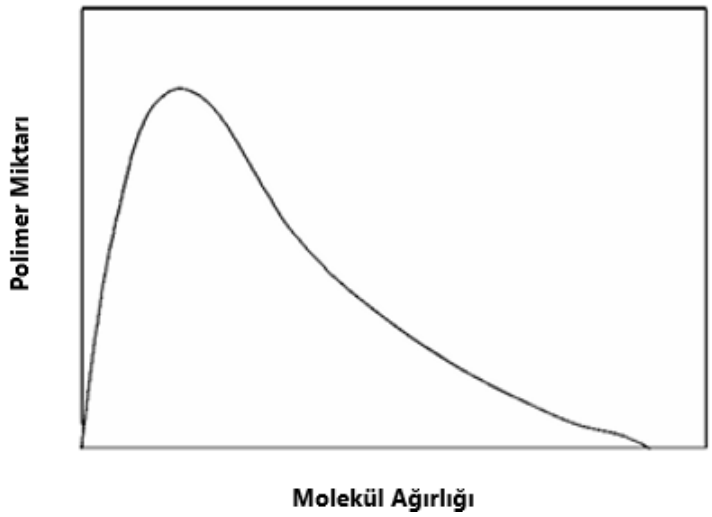
Zincirleme reaksiyon polimerizasyonları (ekleme polimerizasyonları olarak da adlandırılır) polimerizasyonun gerçekleşmesi için bir başlatıcıya ihtiyaç duyar. Başlatma, serbest radikal, anyon veya katyon sınıfları tarafından gerçekleşebilir. Başlatıcılar vinil monomerinin kopan bağlarıyla beraber reaksiyonu başlatır. Reaksiyon Şekil 2.1'de gösterildiği gibi ilerler. Zincir reaksiyon polimerleri genellikle baz yapılarında sadece karbon içerir ve PVC, polistiren gibi polimerleri kapsar. Düşük molekül ağırlıklı türlerin aksine, polimerik malzemeler tek bir

molekül ağırlığına sahip değildir; bunun yerine, Şekil 2.3'te gösterildiği gibi bir ağırlık dağılımına sahiptirler. Polimerler için molekül ağırlıkları genellikle iki farklı ortalama molekül ağırlığı ile tanımlanır: sayı ortalama molekül ağırlığı (Mn) ve ağırlık ortalama molekül ağırlığı (Mw). Bu ortalamalar aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanır:

$$\overline{M_w} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{n_i M_i^2}{n_i M_i} \tag{2.2}$$

$$\overline{M_n} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{n_i M_i}{n_i} \tag{2.3}$$

Burada n_i, i türünün mol sayısı ve M_i, i türünün moleküler ağırlığıdır. Polimerlerin moleküler ağırlıkları ve ağırlık dağılımına bağlı olarak işlenme zorlukları oluşur. Bu yüzden polimerin bu özelliklerini tespit etmek elzemdir. Bunu tespik etmek için ozmotik basınç, ışık saçılması gibi birçok farklı yöntem kullanılmaktadır [43].

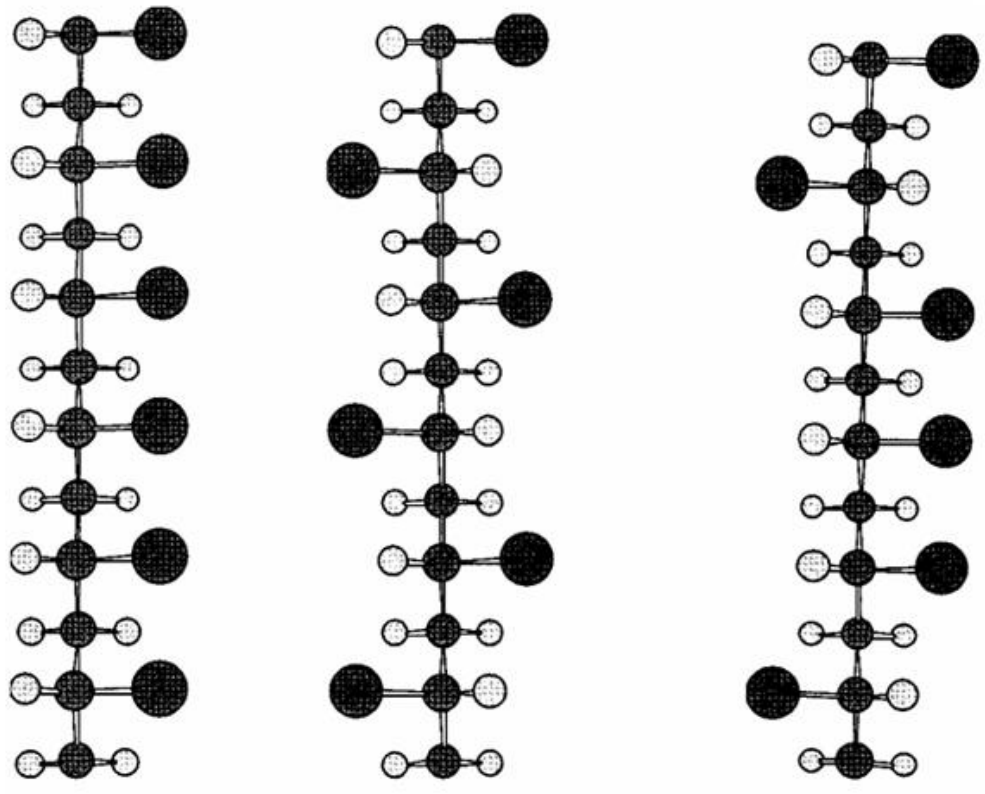


Şekil 2.3 Moleküler ağırlık dağılımı

2.1.2 Kristalizasyon ve Erime Davranışı

Polimer katı haldeyken, zincir yapısına ve işleme koşullarına bağlı olarak farklı yapısal özellikler gösterebilir. Rastgele ve düzensiz yapıya sahip polimerlere Amorf denmektedir. Örneğin PVC, poliamid gibi yapılar amorflara örnek olarak verilebilir. Polimer baz yapısı düzenliyse ve düzgün bir yapıya sahipse, polimer düzenli bir kristal yapıya sahip olabilir, ancak malzeme genellikle sadece yarı kristalin olacaktır. Bu yapılara örnek olarak polietereterton, polietilen ve polivinilden florür verilebilir. Polimer baz bileşimi ve yapısı, polimerin kristalleşip

kristalleşemeyeceğini belirleyen faktörlerdir. Bu mikro yapı, çeşitli sentetik yöntemlerle kontrol edilebilir. Daha önce bahsedildiği gibi, Ziegler-Natta katalizörleri, mikro yapıyı kontrol ederek stereospeifik polimerlerin üretimini mümkün kılabilir. Bir vinil polimer için elde edilebilecek mikro yapı türleri Şekil 2.4'de gösterilmiştir. İzotaktik ve sindiyotaktik yapılar, oldukça düzenli omurgaları nedeniyle kristalleşebilirken, ataktik form amorf bir malzeme üretir. Kristalleşme kinetiği ve kristalleşme sıcaklığı gibi birçok faktör polimerdeki kristalinite miktarına doğrudan etki etmektedir. Soğutma hızı da önemli faktörlerden biri olarak gösterilebilir. Bu nedenle, kristalleşmenin derecesi, belirli bir polimer için önemli ölçüde farklılık gösterebilir ve işleme koşulları ile kontrol edilebilir. [43].



Şekil 2.4 İzotaktik, sindiyotaktik ve ataktik polimer zincirleri [43]

2.1.3 Mekanik Özellikler

Polimerlerin mekanik davranışı, polimer türü, moleküler ağırlık ve test prosedürü dahil olmak üzere birçok faktöre bağlıdır. Uluslararası standartlara uygun yapılan bir çekme testi yapıldıktan sonra modül değerleri elde edilir. Gerilim ve şekil değiştirme arasındaki ilişki malzemenin Young Modülü değerini bize vermektedir. Tipik değerler aşağıdaki tabloda bulunmaktadır. Polimerlerin davranışları farklı sıcaklık ve basınç gibi çevresel faktörlere çok bağlıdır. Özellikle cam geçiş

sıcaklığında veya ona yakın sıcaklıklarda yapılan testlerde önemli ölçüde özelliklerinde ve davranışında değişiklikler gözlemlenmiştir [43].

Tablo 2.2 Termoplastiklerin Karşılaştırmalı Özellikleri

Materyal	Isı Sapma Sıcaklığı 1,82 MPa (°C)	Çekme Dayanımı MPa	Çekme Modülü GPa	Darbe Dayanımı J/m	Özkütle gr/cm^3	Dielektrik Dayanım MV/m	Dielektrik Sabiti (60 Hz)
PS	93	45,1	3,1	59	1,05	19,7	2,5
PI		42,7	3,7	320	1,43	12,2	4,1
CAB	69	34	0,88	346	1,19	12,8	4,8
PTFE		17,1	0,36	173	2,2	17,7	2,1
PCTFE		50,9	1,3	187	2,12	22,2	2,6
PVDF	90	49,2	2,5	202	1,77	10,2	10
PB	102	25,9	0,18	NB	0,91		2,25
LDPE	43	11,6	0,17	NB	0,92	18,9	2,3
HDPE	74	38,2		373	0,95	18,9	2,3
PMP		23,6	1,1	128	0,83	27,6	
CA	68	37,6	1,26	210	1,3	16,7	5,5
PP	102	35,8	1,6	43	0,9	25,6	2,2
PUR	68	59,4	1,24	346	1,18	18,1	6,5
ABS	99	41	2,3	347	1,18	15,7	3,0
PVC-sert	68	44,4	2,75	181	1,4	34	3,4
PVC-esnek		9,6		293	1,4	25,6	5,5
POM	136	69	3,2	133	1,42	19,7	3,7
PMMA	92	72,4	3	21	1,19	19,7	3,7
Polyarylate	155	68	2,1	288	1,19	15,2	3,1
LCP	311	110	11	101	1,7	20,1	4,6
Nylon 6	65	81,4	2,76	59	1,13	16,5	3,8
Nylon 6.6	90	82,7	2,83	53	1,14	23,6	4
PPS	260	138	11,7	69	1,67	17,7	3,1
PC	129	69	2,3	694	1,2	15	3,2
PEEK	160	93,8	3,5	59	1,32		
PEI	210	105	3	53	1,27	28	3,2
PES	203	84,1	2,6	75	1,37	16,1	3,5
PET	224	159	8,96	101	1,56	21,3	3,6
PPO	100	54	2,5	267	1,09	15,7	3,9
PBT	54	52	2,3	53	1,31	15,7	3,3
PSU	174	73,8	2,5	64	1,24	16,7	3,5
POM	136	69	3,2	133	1,42	19,7	3,7
PB	102	25,9	0,18	NB	0,91		2,25

2.1.4 Dolgu Maddeleri

Plastik matrise dahil edilen katkı maddeleri dolgu maddesi olarak anılmaktadır.Bu maddeler genelde organik olmayan maddelerdir ve maddenin fiziksel yapısında

bıraktıkları etkiye göre sınıflandırılabilir. Bazı dolgu maddeleri, bileşiğin maliyetini düşürmek amacıyla eklenirken, takviye edici dolgu maddeleri, elastikiyet, darbe dayanımı veya çekme dayanımı gibi belirli mekanik özellikleri iyileştirmek için polimerin yapısına dahil edilmektedir. Eylemsiz olarak adlandırılmalarına rağmen, eylemsiz dolgu maddeleri yine de bileşiğin maliyetin yanı sıra diğer özelliklerini de etkileyebilir. Büzülme, yoğunluk, sertlik, ısıya karşı dayanıklılık gibi özellikleri özelliklerini iyileştirebilirler. Aynı şekilde fiziksel strese karşı dayanım, basınç dayanımı, kesme dayanımı da artıracak özellikleri polimere ekleyebilirler. Bu mekanik özelliklerin iyileşmesi için dolgu maddesi ve polimer arasında farklı şekilde tepkimeler gerçekleşebilir. Örneğin aralarında bir kimyasal bağ oluşabilir ve termoplastiğin içinde bulunan doldu maddesi kapladığı hacimdeki özellikleri değiştir. Aynı zamanda bu dolgu maddeleri polimerin parçacık boyutunu ve kimyasal özelliklerini değiştirmektedir. Parçacık boyutundaki değişiklik büyüklüğüyle ters orantılı olarak sisteme etki etmektedir. Boyut büyüdükçe polimerin özellikleri daha kötüye gitmektedir. Parçacıkların polimer içinde yönlendirilmesi de söz konusudur. Bu parçacıkların polimerle homojen bir yapı meydana getirmesi ve polimerin yüzeyine düzgün dağılması birçok kimyasal ve fiziksel özelliğe doğrudan etki etmektedir. Polimer, parçacık yüzeyini ıslatmalı ve en iyi özellik iyileştirmesini elde etmek için iyi arayüz bağına sahip olmalıdır. Eylemsiz dolgu maddeleri çok çeşitli olmakla beraber Baryum Sülfat, Alüminyum oksit, Silika gibi malzemeler örnek olarak verilebilir. Şekil 2.3'de bazı dolgu maddelerinin özelliklerine göre sıralanışını görebilirsiniz [43].

Tablo 2.3 Çeşitli dolgu maddeleri [43]

Küresel	**Tabakalı**	**Lifli**
Kum / kuvars tozu	Mika	Cam elyafı
Silika	Talk	Asbest
Cam küreleri	Grafit	Vollastonit
Kalsiyum karbonat	Kaolin	Karbon elyafı
Karbon siyahı		Whisker
Metal oksitler		Selüloz
		Sentetik elyaflar

2.2 Termoplastikler

Genel olarak termoplastikler yumuşak ve şekil verilebilir durumdayken, soğuduğunda katılaşıp sertleşen polimerlerdir. Bu özellikleri, termoplastiklerin işlenebilirliğini arttırır ve onları birçok endüstriyel uygulama için ideal bir malzeme yapar. Kimyasal yapıları gereği, termoplastikler fiziksel ve mekanik özelliklerde esneklik ve geniş bir kullanım yelpazesi sunar. Çok çeşitli termoplastikler olmakla beraber her geçen gün çeşitlilik artmakta ve farklı nano parçacıklarla kombine edilen termoplastikler üretilmektedir.

Bu çalışmaların amacı termoplastiği orta ve yüksek gerilim hatlarında çapraz bağlı polietilen yerine kullanabilmek ve güç sistemi ekipmanlarında geri dönüştürülebilir malzemelerle çalışmak olduğu gibi aynı zamanda elektriksel ve fiziksel özellikleri daha gelişmiş sentetik polimerler üretmektedir. Unutmak gerekir ki bu polimerler yalnızca güç sistemlerinde değil aynı zamanda otomotiv sanayii, ambalaj sanayii vb. sektörlerde çokça kullanılmaktadır.

Termoplastiklerin her geçen gün geliştirilmesiyle beraber neme, sıcaklığa, kimyasallara ve fiziksel strese daha dayanıklı hale gelmektedir. Dönüştürülebilir ve yeniden işlenebilir malzemeler olması sebebiyle termoplastikler üzerine çalışmalar devam etmekte giderek daha iyi çalışma değerleri veren termoplastikler üretilmektedir. Sonraki bölümlerde güç sistemleri ve kablolarda kullanılan başlıca termoplastikler madde madde incelenecektir.

2.2.1 Polietilen

Polietilen çok çeşitli şekillerde kullanılan bir polimer olup, hem termoplastik hem de termosetler için ana polimerlerden biridir. XLPE, LDPE, HHFR malzemelerin üretilebildiği polietilen, farklı proseslerden geçerek ve farklı katalizörlerin kullanılmasıyla çeşitli termoplastiklerin ve termosetlerin üretilmesine imkan sağlamaktadır.

Polietilen yoğunluğuna yani türlerine göre değişecek şekilde 90 °C'den 140 °C'de yumuşamaya başlar, yumuşamış ya da erimiş olsa bile yine bir termoplastik özelliği gösterir ve soğuduğunda eski haline gelir. Tezde yapılan çalışmalarda da soğuyup eski haline geldiğinde birçok özelliğini koruduğu da gösterilmiştir. Genel olarak iyi sayılabilecek bir çekme dayanımına sahiptir ve iyi bir yalıtkan üründür. Yoğunluğu suya nispeten düşük olabilmektedir.

Birçok polimerin monomeri olarak kullanılmaktadır. Farklı üretim süreçlerinden sonra çeşitli polimerler üretilir ve bu polimerlerin tekrar farklı proseslerden geçirilmesiyle birçok farklı polimer türü ortaya çıkmıştır. İyi bir elektriksel yalıtkan, kimyasal direnç, kolay işlenebilirlik ve elastikiyet özelliklerinden dolayı günümüzde sıklıkla kullanılmaktadır.

Çok farklı polimer yapının temelini oluşturmasına rağmen en çok bilinen polimer hali polietilendir. Farklı sıcaklık ve basınç altında prosesleri değiştirerek polietilenin çeşitli formları üretilmiştir. Bu formları tezin ilerleyen bölümlerinde anlatacağız. Polietilen'den farklı olarak örneğin etilen vinil alkol, polipropilen gibi ürünler de bir polietilen bazlı üründür. Ancak bunların yapısında yalnızca polietilen değil, farklı ürünler de bulunmaktadır. [44].

Etilen'den üretilen farklı polimerler bulunmaktadır. Polimetilen de bu bunlardan biridir. Bu isim ve kullanış 20.yy ortalarında ortaya atılmıştır. Yapısı polietilenden farklı olsa da polimetilen de etilen bazlı bir polimerdir [45][46].

20 yy. başından beri 0°C'de bor triflorür-dietil eter katalizörlerinin kullanımı da dahil olmak üzere 'polietilen' üretmek için başka yöntemler de geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yöntemlerle üretilen polimerler farklı moleküler özellikler göstermekte ve üretilen her yeni polimer bir önceki formuyla karşılaştırılarak polimerin elektriksel, fiziksel, kimyasal özelliklerindeki iyileşme gözlenir. Polimerleşme sistemi aşağıda formülize edilmiştir [44].

$$n\ Br(CH_2)_{10}BR + 2n\ Na \rightarrow \sim(CH_2)_{10n}\sim + 2n\ NaBr \qquad (2.4)$$

Bazen araştırma amaçlı faydalı olabilecek başka yollar da tasarlanmıştır ve bunlar arasında şunlar yer alır:

- Karbon monoksitin hidrojenle modifiye Fischer-Tropsch redüksiyonu
- Poli(vinil klorür)ün lityum alüminyum hidrit ile indirgenmesi
- Polibütadienin hidrojenasyonu

Ticari olarak polietilen, etilenden üretilir; polimer bu yolla Mart 1933'te üretilmiş

Polietilende de diğer polimerlerde olduğu gibi testin hızı, test sıcaklığı, örnek hazırlama yöntemi, örneğin büyüklüğü ve şekli ile, polietilen için yalnızca küçük bir ölçüde, örneklerin test öncesi koşullandırılmasına da bağlıdır.

Yük altında, polietilen zamanla sürekli olarak deformasyona uğrar (‘sarkma’). Sarkma davranışını bilmek, yük taşıyan uygulamalar düşünüldüğünde önemlidir, su borusu gibi uygulamalarda polietilenin davranışını örnek verebiliriz. Genel olarak, yük arttıkça, sıcaklık arttıkça ve yoğunluk azaldıkça sarkma da artacaktır. Sarkma verilerinin büyük bir kısmı, özel monografilerde ve ticari literatürde mevcuttur. Termal açıdan bakıldığında düşük sıcaklıklarda kırılgan hale gelen bu polimer oda sıcaklığında sert halde bulunmaktadır. Kimyasal açıdan bakıldığında oksidasyon polimerlerin yapısını bozan, fiziksel ve elektriksel özelliklerini yitirmesine neden olan kimyasal olaylardan biridir. Polietilenin oksidasyonu, yapısal değişikliklere yol açarak 50°C gibi düşük sıcaklıklarda bile ölçülebilir bir şekilde gerçekleşebilir. Oksidasyon yalnızca sıcaklık ve oksijene maruz kalmakla değil, düşük sıcaklıklar UV ışınlarına maruz kalmak da oksidasyona sebep olabilir. Daha ileri oksidasyon, renk değişikliği ve çizgilenmelere yol açabilir; örneğin, polimerler 1-2 saat boyunca yaklaşık 150°C'de bir iki silindirik merdanede işlendiklerinde ürün ipliksi hale gelir ve akış kabiliyetini kaybeder. Böyle aşırı işlem koşullarının nadiren meydana geldiği görülse de polimerin oksidasyonunun çok daha erken bir aşamasında güç faktöründe ciddi bir bozulma gözlemlenir ve özellikle elektriksel yalıtım uygulamaları için antioksidanların dahil edilmesi gereklidir. Daha az dallanmış yüksek yoğunluklu polietilenin, daha az sayıda üçüncül karbon atomu nedeniyle oksidasyona karşı daha dirençli olması beklenir. Polietilen, belirli bir etkileşime giremeyen, kristalin bir hidrokarbon polimeri olup yaklaşık 100°C'de erime noktasına sahiptir, bu nedenle oda sıcaklığında çözünürlük göstermez. Düşük yoğunluklu polimerler, yaklaşık 60°C'de benzende çözünebilirken, daha kristalin yapıdaki yüksek yoğunluklu polimerler ancak 20-30°C daha yüksek sıcaklıklarda çözünür. Ancak benzer çözünürlük parametresine ve düşük moleküler ağırlığa sahip maddeler, şişmeye yol açabilir; bu etki özellikle düşük yoğunluklu polimerlerde daha belirgindir.

Polietilenin ağ oluşturma sebeplerinden biri de ışına maruz kalmaktır. Yüksek enerjili bu ışınlara maruz kalan polimerden hidrojen gibi bazı alçak seviyeleri gazlar salınır. Moleküller arasında karbon bağları oluşmasıyla sonuçlanan bu reaksiyon sonucunda ağ oluşturma meydana gelir.

Ağ noktalarının oluşumu, kristalleşmeyi engeller ve ilerleyici ışınlama, sonunda amorf ama ağ yapısına sahip bir polimer ortaya çıkarır. Uzun süreli ışınlama renk

oluşumuna yol açabilir ve havanın etkisiyle yüzey oksidasyonu meydana gelir. Oksijen, ışınlama sırasında polimerin bozulmasına neden olarak ağ oluşumunun etkilerini dengeleyebilir. İnce filmlerin oksijen varlığında düşük dozda uzun süre ışınlanması ciddi bozulmalara yol açabilir, ancak kısa süreli ışınlama, yüksek dozda ışınlama ve daha kalın örneklerde bozulma etkileri daha az belirgin hale gelir. Işına maruz bırakma her zaman pozitif yönde etki etmez. Kristal yapının kaybolmasıyla beraber ağ oluşumu gerçekleşse bile çekme kopma dayanımı azalabilir. Işına maruz kalan polimer 120 °C ve üzeri sıcaklıklarda hala belirli bir dayanıma sahipken işlem görmemiş ürünün fiziksel dayanımı yoktur diyebiliriz. Ayrıca, polietilene karbon siyahı eklenmesi ve ardından ışınlanması, önemli bir güçlendirme sağlayabilirken, aynı miktarda karbon siyahı işlenmemiş ürüne eklendiğinde kırılganlığa yol açar.

Polietilen, belirli ortamlarda mekanik strese maruz kaldığında, ortamın olmadığı duruma kıyasla çok daha düşük gerilimlerde kırılabilir. Buna bağlı olarak, sabit bir gerilim veya alternatif olarak sabit bir gerilme örneğe uygulandığında, kırılma süresi 'aktif ortamda', ortamın olmadığı duruma göre çok daha kısa olur. Oluşan bu duruma çevresel gerilim çatlaması adı verilmiştir, kaynaklarda bu isimle anılmaktadır. Bu etkinin anlaşılabilmesi için çeşitli test yöntemleri geliştirilmiştir. Bell'in telefon laboratuvarı testi buna örnek olarak verilebilir. Dikdörtgen bir numune üzerinde kesici bir aletle sabit bir en ve boyda yaralanır. Formu değişmiş numune dikey bir eksende bükülür. Bükülen örnek bir düzeneğe yerleştirilir ve genellikle alkil aril polietilen glikol eteri (örneğin Igepal CA) gibi bir deterjan içinde 50°C'de bir fırına konur. >20 MFT değeri olan yoğunluğu düşük polimerlerin 2 saatten daha kısa bir sürede çatladığı görülmüştür. Çevresel stres çatlamasına yol açabilen ortamlar arasında alkol, sıvı hidrokarbonlar, organik esterler, metalik sabunlar, sülfatlanmış ve sülfone alkoler, poliglokol eterleri ve silikon sıvıları yer almaktadır. Hatta listeye bağlı olarak polietilenin kullanımına bazı limitler geleceği izlenimi orta çıkmıştır. Ancak bir dizi nedenle, bu durum bir problem teşkil etmemiştir, yalnızca yüksek yoğunluklu homopolimerlerde bu durum bir sorun oluşturmuştur ve çatlama fenomeni ile ilgili asıl endişe, polietilen yalıtkanının gres ve yağlarla temas halinde olduğu kablolarla ilgilidir.

Yukarıda adı geçen sıvı sınıflarının etkinliğinin tam olarak neden kaynaklandığı tam olarak anlaşılmamış olsa da en aktif sıvıların, moleküler kohezyonu en büyük ölçüde azaltanlar olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, bu etkinin, biyaksiyel

gerilimlerin (ki bu durum genellikle daha yüksek kırılganlık eğilimine yol açar) söz konusu olduğu durumlarda çok daha ciddi olduğu fark edilmiştir. Bu tür gerilimler, işleme sırasında moleküler yönelim nedeniyle dondurulmuş olabilir veya kullanım sırasında meydana gelen bozulmalar sonucu ortaya çıkabilir.

Farklı polietilen türleri çevresel gerilim çatlama direnci açısından önemli ölçüde farklılık gösterir. Düşük yoğunluklu polimerlerde, Bell Testi genellikle moleküler ağırlık arttıkça direncin de arttığını gösterir; özellikle erime akış indeksi 0.4 olan düşük yoğunluklu polimerler, yaygın deterjanlara karşı dirençlidir. Polimer dayanıklılığını artıran özelliklerden biri de molekül ağırlık dağılımlarının yapısının dar olmasıdır. Aynı zamanda kristalin yapısı ve molekül davranışları duruma göre polimeri negatif yönde etkileyebilir. Yoğunluk etkisiyle ilgili olaraksa kesin bir şey söylemek mümkün değildir. Bell Testi sabit gerilme altında yapılır ve dolayısıyla yüksek yoğunluklu polimerlerde çok daha yüksek gerilimler söz konusu olacaktır. Bu nedenle, bu malzemelerin bu testte genellikle daha düşük performans göstermesi şaşırtıcı değildir, ancak sabit gerilim testlerinde farklı sonuçlar beklenebilir. Paradoksal bir şekilde, Phillips tipi homopolimerlerin, Bell Testi tarafından gösterildiği kadar tatmin edici olmadığı, hizmette daha düşük performans gösterdiği gözlemlenmiştir [44].

Elektriksel özelliklere gelirsek polietilenin yalıtkanlık özellikleri, diğer dielektrik malzemelerle karşılaştırıldığında oldukça iyidir. Sıcaklık ve frekans gibi özellikler yalıtkanlık performansı üzerinde nerdeyse bir etki oluşturmamaktadır. Bunun sebeplerinden biri polietilenin kutupsuz bir malzeme olmasıdır. Dielektrik sabitinin değeri yoğunluk azaldıkça azalmaktadır. Talo 2.4'te polietilenin gün faktörü ve bazı dielektriksel özellikleri gösterilmiştir.

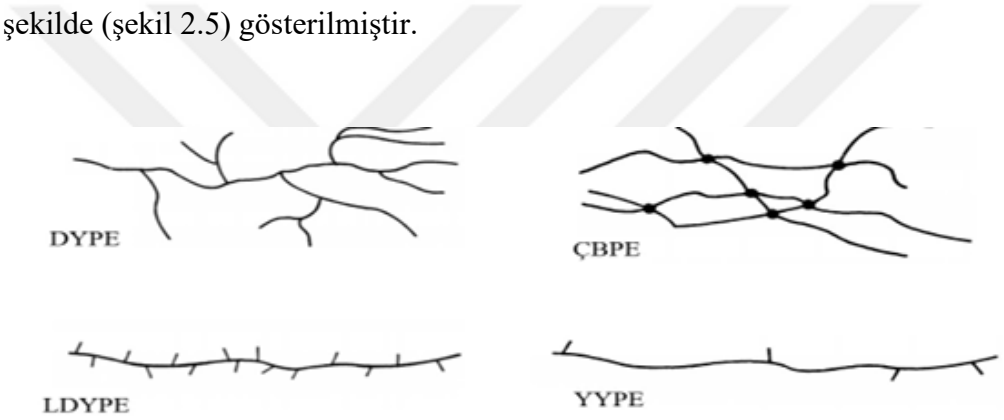
Oksidasyon malzeme yapısında ciddi değişimlere yol açmaktadır. En başta güç faktörü olmak üzere bütün elektriksel özelliklerini etkilemektedir. Bu uygulamaya göre iyi ya da kötü olarak adlandırılabilir. Ancak çoğunlukla istenmeye bu etkiyi azaltmak için yalıtkanın yapısına antioksidanlar eklenir [44].

Tablo 2.4 Polietilenin elektriksel özellikleri [44]

Hacimsel direnç	$>10^{22}\Omega m$
Dielektrik dayanım	700 kV/mm
Dielektrik sabiti	
Yoğunluk = 0,92 gr/cm^3	2,28
Yoğunluk = 0,96 gr/cm^3	2,35
Güç faktörü	~ 1,2 x 10^{-4}

2.2.2 LDPE, HDPE, LLDPE, VLDPE

LDPE, HDPE, LLDPE ve VLDPE, polietilen türleridir ve her biri farklı özelliklere sahip olup, çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılır. Temel yapıları aşağıdaki şekilde (şekil 2.5) gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Polietilen türlerinin zincir yapısı

Bu türlerin genel özelliklerine bakmak gerekirse, yoğunlukları, temel fiziksel ve kimyasal özellikleri aşağıdaki gibi maddeler halinde sırlanabilir.

LDPE (Low-Density Polyethylene - Düşük Yoğunluklu Polietilen):

- Yoğunluk: Yaklaşık 0.910 - 0.940 g/cm³
- Yapı: Düşük yoğunluklu polietilen, oldukça dallı bir moleküler yapıya sahiptir. Bu yapısı sayesinde düşük yoğunluk ve yüksek esneklik sağlar.
- Özellikler:
    - Esneklik ve yumuşaklık sağlar.
    - Kimyasal dayanıklılık yüksektir.
    - Elektriksel yalıtım özellikleri vardır.

- Sıkça plastik torbalar, bottle caps (şişe kapakları), ambalaj filmleri ve çift katmanlı plastik torbalar gibi uygulamalarda kullanılır.
- Düşük mukavemet ve yüksek gerilme direnci ile dikkat çeker.

Daha çok ambalaj endüstrisinde kullanılan LDPE aynı zamanda çeşitli endüstri kollarında da kullanılmaktadır. Önceleri kontrol ve veri kablolarında sıkça kullanılan bu polimer hala bazı alüminyum iletkenli 2-10 kV arasındaki kablolarda izolasyon olarak kullanılmaktadır. Tez içerisinde incelenen termoplastiklerden biri olduğu için elektriksel özelliklerini de görmek faydalı olacaktır.

Tablo 2.5 LDPE'nin elektriksel özellikleri [47]

Özellik	**Yüksek Yoğunluklu Polietilen**	**Düşük Yoğunluklu Polietilen**
Delinme dayanımı (kV/mm)	45-50	30-35
Tan delta (1 MHz)	5	0,001
Dielektrik sabiti	3-4	2,3-3

LDPE üzerine yapılan çalışmalarda farklı kompozitlerle veya liflerle birleştirerek güçlendirilmeye çalışılmıştır [48].

HDPE (High-Density Polyethylene - Yüksek Yoğunluklu Polietilen):

- Öz kütle: Alt ve üst sınırı 0,941 gr/cm^3 ile 0,965 g/cm^3 arasındadır
- Kimyasal özellikleri: Yapısındaki sınırlı dallanma özeliğinden dolayı yoğunluğu fazla ve dayanımı yüksektir. Aynı zamanda XLPE üretiminde kullanılan polimerlerden biridir.
- Özellikler:
  - Yüksek dayanıklılık, yüksek gerilme mukavemeti ve şekil alma direnci sunar.
  - Kimyasal dayanıklılık çok yüksektir, özellikle asidik ve alkali maddelere karşı.
  - Yüksek sıcaklık dayanımı ve düşük sıcaklıkta kırılganlık özellikleri vardır.

- HDPE, su boruları, şişeler, çöpler, tekerlekler gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılır.
- Çevresel stres çatlamasına karşı daha hassas olabilir.

Yüksek yoğunluklu polietilenin kısaca kullanım alanı ve üretim sürecinden bahsetmek gerekirse, alman kimyageri Hans von Pechmann, 19. yüzyılın sonlarına doğru eter içinde bir tür metanla çalışırken bir çökelti gözlemlemiştir. 1900 yılında Eugen Bamberger ve Friedrich Tschirner, bu bileşiği polimetilen olarak tanımlamışlardır. Otuz yıl sonra, etileni yüksek bir basınca tabi tutarak, Amerikalı kimyager Carl Shipp Marvel yüksek yoğunluklu bir kalıntı yaratmıştır. 1935 yılında, etilen ile yüksek basınçta çalışan iki İngiliz kimyageri, katı bir polietilen türü yaratmışlardır. Karl Ziegler'ın Nobel kimya ödülü almasına sebep olan bu polimer ilk defa 2. Dünya savaşı sırasında üretilmiştir. Radar kablolarında kullanılan yalıtkan bazı proseslerden geçirilerek 20 yy. ortasında 2 bilim adamı tarafından ilan edilmiştir. Daha sonra ilk olarak boru üretiminde kullanılmaya başlanmıştır ticari olarak.

Özellikle drenaj poMPalarında termoplastikler nerdeyse tek başına kullanılan polimerlerdir diyebiliriz. Üstün suya, neme ve kimyasal maddelere dayanıklılık şüphesiz onların seçilmesindeki en temel nedenlerin başında gelmektedir. Aynı zamanda iyi bir elektrik yalıtkanı olması göz ardı edilmemelidir. Son 50 yıl endüstrinin bu kolunda termoplastiklerin özellikle HDPE'nin tek başına kullanıldığını görmekteyiz ve görmeye devam edeceğiz gibi duruyor.

Son 50 yıldan beri, tüm diğer plastik borulardan daha fazla HDPE drenaj borusu kurulmuştur ve bu, tarımsal drenaj uygulamalarından doğmuştur [48].

LLDPE (Linear Low-Density Polyethylene - Lineer Düşük Yoğunluklu Polietilen):

- Yoğunluk: Yaklaşık 0,915 – 0,925 g/cm³
- Yapı: LLDPE, LDPE'ye benzer şekilde düşük yoğunluktadır ancak molekülleri daha lineer ve düzdür. Bu nedenle, daha iyi mekanik özellikler sunar.
- Özellikler:
  - Esneklik ve yüksek gerilme mukavemeti sağlar.

- LDPE'ye kıyasla daha iyi delinme ve yırtılma direnci vardır.
- Yüksek sıcaklık dayanımı ve iyi çevresel stres çatlama direnci ile tanınır.
- Film üretimi, ambalaj malzemeleri, boru hatları gibi çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılır.
- Çevresel stres çatlama direnci yüksektir, bu nedenle daha dayanıklı ve uzun ömürlüdür.

VLDPE (Very Low-Density Polyethylene - Çok Düşük Yoğunluklu Polietilen):

- Yoğunluk: Yaklaşık 0,880 – 0,915 g/cm³
- Yapı: VLDPE, daha fazla dallanmış bir yapıya sahip ve düşük yoğunluklu bir polietilendir. Bu, ona oldukça esnek ve hafif bir özellik kazandırır.
- Özellikler:
  - Yüksek esneklik ve yüksek gerilme mukavemeti sağlar.
  - Düşük sıcaklıklarda bile esneklik sunar.
  - Yüksek gerilme dayanımı ve düşük kırılganlık ile tanınır.
  - Sıvıların geçişini engelleme ve yırtılma direnci yüksektir.
  - Genellikle plastik torbalar, film kaplamalar, çift katmanlı ambalajlar gibi uygulamalarda kullanılır.

2.2.3 Polipropilen

Natta'nın alkenler için yüksek relatif mol kütleli polimerlerin sentezleyici katalizörleri üzerine yaptığı araştırmaların ardından, bu polimer [-CH_2 $CH(CH_3)$-]n yapısına sahip bir madde olarak pazarlanabilir bir ürün haline geldi. Natta, 1954 yılında, etilen polimerizasyonu üzerine yaptığı çalışmaların bir sonucu olarak, benzer polimerlerin propilen için üretilebileceğini göstermiştir. Bu, 1957'de hızlı bir ticari kullanım sonrası ilk kez tanıtılmıştır. Bu polimerin ve polietilenin isimlendirilmesiyle ilgili resmi sorunlar bulunmaktadır çünkü IUPAC ismi olan polipropilen, nadiren veya hiç kullanılmaz.

Polipropilen ilk kez üretildiğinde iki formda var olduğu keşfedildi. Bunlardan biri, polietilene benzerdi, ancak daha yüksek sertlik ve sağlamlığa sahipti; diğeri ise amorf ve zayıf olduğu bulunmuştur.

Polipropilen, polietilenden biraz farklıdır ve ticari polipropilen'in yaklaşık %90–95'i izotaktik yapıya sahiptir. Bu izotaktik yapı, polipropilenin moleküllerinin düzenli ve paralel bir şekilde sıralandığı anlamına gelir, bu da polimerin daha yüksek kristallik, daha iyi mekanik özellikler ve daha yüksek erime sıcaklığına sahip olmasını sağlar. Bu, polipropilenin sert ve dayanıklı olmasına katkıda bulunur. Propilenin başlıca özellikleri ve polietilenle karşılaştırması aşağıdaki gibidir [49].

- Nispeten düşük yoğunlukludur (0.90 g/cm³).
- Kullanılabildiği sıcaklık aralığı nispeten yüksek termal dayanımı sayesinde geniştir. Genellikle şişe tarzı konteynerlerin üretiminde kullanılır ve sıcak sıvıların etkilerine karşı çok dirençlidir.
- Hava koşullarına maruz kaldığında kırılmaya meyilli değildir.
- İzo-taktik propilenin sahip olduğu karbon ve hidrojen bağları kolayca dağılabilmektedir. Bir diğer özelliği ise ne kadar bükerseniz bütün ürünün kırılganlığına dair bunun negatif bir etkisinin olmamasıdır. Sıradışı bir özelliktir ve uygulamaya göre bu tip propileni çok kullanışlı hale getirebilmektedir. Uzun seneler sorunsuz kullanılan bilen yekpare ürünlerin üretiminde kullanılmaktadır.

Bu özellikler, izotaktik poli(propilen)'in çeşitli uygulamalarda kullanılabilirliğini artırır ve uzun süre dayanıklılığını sağlar [49].

2.2.4 Poliüretan

Poliüretan, karbamat (üre) bağlarıyla karakterize edilen, karbon temelli bileşenlerden oluşan bir zincirdir ve genellikle bir diizosiyanat ile bir poliyolün (polieter veya polyester) reaksiyona girmesiyle oluşur. Çoğunlukla hidrokarbon zincir uzatıcılar katılık derecesini artırmak için kullanılmaktadır. Poliüretanlar, yumuşak ve sert segmentlere sahip poliyol blok kopolimerleri dizisi olarak tanımlanabilir. Segmentli kutuplu ve nonpolar segmentlerin farklı kutuplaşmaları nedeniyle poliüretanlarda mikro faz ayrımı meydana gelebilir. Poliüretanlar, pacemaker elektrotları ve ventriküler yardımcı cihazlar da dahil olmak üzere çeşitli

tıbbi cihazların üretiminde kullanılmıştır. Çoğunlukla insan sıvılarıyla temas eden ürünlerin üretimi için kullanılmaktadır. Çok çeşitli kullanılışları mevcut olmakla beraber biyolojik olarak parçalanabilme yetileri giderecek artırılmaktadır. Yapıları yumuşatır. Son zamanlarda, akıllı şekil hafızalı poliüretan ile yapılmış bir balon yardımıyla, tıkalı koroner arterlerin içine yerleştirilen kardiyoloji stent ürünleri piyasaya sürülmüştür [49].

2.2.5 Polivinil Klorür

Polivinil klorür (PVC) bulunduğu ve ortam sıcaklığına göre esnek, termal olarak yumuşama sıcaklıklarının altında stabil bir polimerdir. Kolay işlenebilir bir polimer olması onu birçok alanda kullanılabilecek hale getiren en önemli faktörlerden biridir. Günümüzde dünyada en çok kullanılan termoplastik olduğu tahmin edilmektedir. Birçok kimyasala karşı yüksek dayanıklılık göstermesi, tuza ve polar çözücülere karşı dayanıklı olması kullanım alanının bu kadar geniş olmasını açıklayan özelliklerden bazılarıdır. Yumuşak ve metallere nispeten hafif olduğu için ağırlığın azaltılması gereken uygulamalarda çokça kullanılmaktadır. PVC polimerleri, ayrıca enstrüman panelleri, elektrik kabloları, borular, kapı panelleri gibi birçok alanda kullanılır.

Bu termoplastik üretim proseslerine göre sertlik ve yumuşaklık seviyeleri ayarlanabilen ürünlerdir. İçerisinde bulunan bileşenler çekme dayanımını, kimyasal direncini ve bazı asit gruplarına karşı dayanım kazandırır. Örneğin, esnek vinil katmanları, taş sıçramalarına karşı koruma, ses yalıtımı, sızdırmazlık maddesi olarak ve alt gövde, çamurluklar ve rocker paneller gibi yaygın olarak maruz kalan alanları kaplamak için koruyucu kaplamalar olarak kullanılır. Bugün araçlarda PVC bileşiği, gösterge panelleri ve eşikler, güneşlikler, sentetik deri koltuk örtüleri, tavan dökümleri, conta lastikleri, çamurluklar, ses ve titreşim yalıtımı sağlayan bileşenler, zemin kaplamaları, dış yan kaplamalar ve koruyucu şeritler gibi alanlarda kullanılır. PVC konvensiyonel diğer malzemelere nispeten hafif olduğundan dolayı otomotiv sektöründe çokça kullanılmaktadır. Ayrıca radyoaktif ışınımlara karşı da dayanımı yüksektir. Sıcaklığın belirli seviyeler aralığında kalmak şartıyla sürekli olarak artıp düşmesi de bu termoplastiği çok etkilememektedir [49].

Dielektrik özellikleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 2.6 Polivinil Klorür elektriksel özellikleri

Özellik	**Polivinilklorür**
Delinme dayanımı (kV/mm)	25
Tan delta (1 MHz)	0,015-0,02
Dielektrik sabiti	3,5

PVC çok çeşitli kompozitler ve fiberlerle geliştirilmeye çalışılmış ve çok sayıda farklı PVC türü bulunmaktadır. Bu çalışmaların uygulamaya yönelik amaçlar güttüğünü söylemek yerinde olacaktır. Zira daha çok uygulamaya yönelik istenilen özelliği güçlendirmek adına kısıtlı bir özelliği güçlendirmek adına çalışmalar yapılmıştır.,

2.2.6 Poliamid

Poliamid (PA), ilk ticari termoplastik mühendislik polimeri olarak bilinir ve genellikle Naylon olarak adlandırılır. 20 yy. başlarında ilk defa sentezlenmiştir. PVC gibi bu termoplastik de otomotiv endüstrisinde çokça kullanılmaktadır. Yalnızda poliamid değil farklı türleri de farklı otomotiv uygulamalarında kullanılmaktadır. Örneğin cam elyafı dolgulu halleri motor kaputunda kullanılmaktadır. Ayırca silindir kapağı, soğutma sistemi, manifold gibi yapılarda da kullanılmaktadır.

Ticari açıdan bakıldığında maliyetleri çok düşürmüş, üretim süreçlerini hızlandırmış ve kullanıldığı yerlerde %40'tan fazla ağırlık azalışına neden olmuştur. Ayrıca tasarım açısından bazı avantajlar sağlamaktadır. Örneğin daha ince tabakaların tasarlanabilmesine imkan vermektedir. Yüzey görünümünü güzelleştirir ve yüzeyin direncini artırır.

PA, motor ve silindir kapağı kapakları, kapı ve bagaj kolları, yan aynalar, jant kapakları, güç trimleri ve far çerçevelerinin üretiminde kullanılır [49].

Bu poliamidler, mekanik dirençlerini ve ısıl dayanımlarını artıran omurgalarında aromatik halkalar içerir [50].

Poliamidler polimeşirken oluşan her amid bağından sonra su açığa çıkar ve bu işlem kondenzasyon şeklinde gerçekleşir. İşlem sırasında fazla su, devolatilizasyon ile uzaklaştırılır, ancak iz miktarda su kalabilir ve monomerler ile polimer arasında kurulan dengeyi etkileyebilir. Poliamidlerin termal bozulma sırasında salınan uçucu ürünler genellikle karbondioksit ve sudan oluşur [50].

Poliamidler, aynı zamanda doğrudan UV ışığını emme eğilimindedir, bu da uyarılma, radikal oluşumu, oksijen eklenmesi, zincir kırılması ve ayrışma gibi süreçlere yol açar ve bu süreçler küçük moleküllerin salınmasına neden olur [39]. Bazı poliamidlerde, fotodegredasyona karşı oto-stabilizasyon, oksitlenmiş bir yüzey tabakasının oluşumu ile sağlanır. Bu tabaka, yakın-UV ve kısa dalga boylu görünür ışığı yüksek oranda emebilir ve sonrasında daha derin tabakalara nüfuz etmeyi engelleyebilir [50].

2.2.7 Polistiren

Çok geniş uygulama alanları mevcut olan bir termoplastiktir. Stiren monomerlerinden oluşmaktadır. Yapısında etilen gibi temel olarak karbon ve hidrojen atomlarından oluşmaktadır. Şeffaf olmasıyla beraber sert bir yapıya sahiptir. Yoğunluğu yaklaşık olarak su ile aynıdır 1.05 gr/cm^3 civarındadır. Şekillendirmesi çok kolay olan bir termoplastiktir. Ticari olarak kullanılan versiyonlarının erime noktası düşükken saf formu 250 derecenin üzerinde bir erime sıcaklığına sahiptir. Farklı kopolimerler eklenerek fiziksel ve kimyasal özellikleri geliştirilebilir. Otomotiv ve tekstil sektöründe fazlaca kullanılmaktadır. Dielektriksel ve kimyasal özellikleri gelişmiştir [50].

2.2.8 Halogen-Free, Flame-Retardant Termoplastikler

Halojensiz ve alev geciktiricili termoplastiklerin kullanımı her geçen gün artmaktadır. Bu malzemeleri alevi yalıtkan üzerinde kolay kolay ilerletmeyen ve yandığında zehirli 7A grubu (Klor, Flor ...) gazlar açığa çıkarmayan yalıtkanlardır. Bu gazları muhtevasında barındırmayan çeşitli polimerlere katalizörler ve alev geciktiriciler eklenerek üretilir. Tezimizde kullandığımız termoplastik polietilen bazlı bir termoplastiktir. Alev geciktirici olarak Alüminyum Hidroksit kullanılmıştır. Termoplastikler birçok farklı sektörde kullanılmakla beraber kablolar için konuşacak olursak, çoğunlukla iç tesisat kablolarında kullanıldığını

söyleyebiliriz. Bununla beraber orta gerilim kablolarında dış kılıp olarak da kullanılmaktadır.

Termoplastikler geri dönüştürülebilir malzemeler olması sebebiyle bugün farklı halojensiz, alev geciktiricili termoplastikler üretilmeye ve üzerinde araştırma geliştirme çalışmaları yapılmaya devam edilmektedir. Sıcaklığa karşı dayanımı yüksek olsa da özellikle orta gerilim kablolarının yoğun nemli ortamlarda da çalışması gerektiğinden tezde bu termoplastik üzerinde nem testleri de yaptık.

Halojensiz, alev geciktiricili yalıtkanlar genel olarak esnek değillerdir. Kablolar için de esnek olması gerekmeyen noktalarda kullanırlar. Sıcaklıkla ve nemle beraber bu yapıları nerdeyse hiç değişmez.

Özellikle yangın sırasında büyük pozitif etkileri olan HFFR yalıtkanlar yapılarına göre değişen şekilde yangını geciktirir ve hatta önleyebilir. Yapılarında bulunan bazı asitlerin yanması sonucu alevi durdurabilir ya da yandığında yüzeyinde siyah karbonlaşmış bir tabaka oluşturarak yangına engel olabilir.

Alev geciktirici olarak Alüminyum Trihidroksit (ATH), Magnezyum Hidroksit (MDH), fosforlu birleşikler veya Melamin Polifosfat gibi bileşikler kullanılmaktadır.

Her ne kadar üretim maliyetleri yüksek olsa da sağladığı çevresel fayda ve insan sağlığı açısından güvenlik, yadsınamaz bir öneme sahiptir.

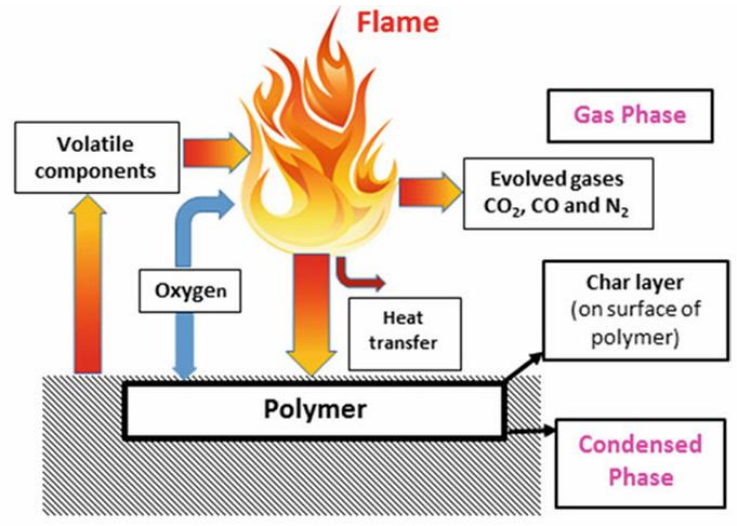
Yanma döngüsünden bahsedecek olursak şunları söyleyebiliriz. Çoğu polimer, petrol hidrokarbon kaynaklarından türetilmiştir ve bu nedenle son derece yanıcıdır. Ancak, herhangi bir malzemenin tutuşabilmesi için oksijen, ısı ve dış enerji gereklidir. Yanma sırasında, polimer parçacıkları havaya karışır; bir polimer yüksek ısı enerjisine maruz kaldığında, önemli bir bozulma gerçekleşir. Bu süreç sırasında, havaya karışan parçacıklar, yanıcı uçucu maddelerle birlikte atmosferik oksijenle karışır. Eğer ortam sıcaklığı, tutuşma sıcaklığına (alevlenme noktası sıcaklığı) yakınsa ya da bu sıcaklığı aşarsa, bu havaya karışan parçacıklar tutuşur. Isının bir kısmı, daha fazla bozulma için polimere geri beslenir, Şekil 2.6'de gösterildiği gibi; benzer şekilde, uçucu bileşikler ve alevler, polimer tamamen yanıp pirolitik bileşikler (ısı, duman, gazlar ve toksik gazlar içeren) üretinceye kadar döngüsel bir süreç içinde yayılır, Şekil 2.6'de olduğu gibi. Şekilde görüşeceği gibi bir polimerin yanma düzeneği ve bu sürecin nasıl bir döngüye evrildiği gösterilmiştir. Alev

geciktiriciler termoplastiklerin yangına karşı dayanıklılığını artırmak için çok değişik türlerde geliştirilmiştir. Tek bir alev geciktirici bulunmamaktadır. Alev geciktirici bileşikler zehirli gazlar içermeyen malzemelere eklendiği için termoplastiğe yalnızca alev geciktirici değil aynı zamanda toksik gaz çıkarmayan hale getirirler. Dolayısıyla alev geciktiricilerin varlığı yangın riskini büyük ölçüde azaltmakla beraber can kayıplarının önüne geçecek etkiyi de göstermektedir.

Termoplastiklerin özellikle iç tesisatta kullanılanların yangına karşı tepkileri ve performansları özellikle son çeyrek asırda büyük önem kazanmıştır. Artık çok katlı ve yüksek yapıların varlığı ve insanların büyük ölçüde kapalı alanlarda yaşıyor olması alev geciktiricili polimerlerin varlığını ve geliştirilmesini zorunlu hale getiriyor. Bu özellikleri ölçmek için çok sayıda test yöntemi geliştirilmiş ve uluslararası standartlara göre farklı test metotları belirlenmiştir. Örneğin duman yoğunluğu ölçümleri için kabloları kapalı bir odada yakıp çıkan dumanın odanın içindeki ışığı ne kadar engellediği ölçülerek bir duman performansı kararı verilmektedir. IEC, EN, HD gibi standartlarda farklı yöntemlerle alev geciktiricilerin kalitesine karar vermeyi kolaylaştıracak ölçümler yapılmaktadır.

HRR, polimerlerin alev geciktirici (FR) etkinliğini değerlendirmek için bir parametredir çünkü ısı varlığında, polimer bozulması hızlanır ve bu da alevin yayılmasından sorumlu havaya karışan bileşenlerin miktarında bir artışa yol açar. Alevle temas ettiğinde, bir FR, radikal veya asidik bileşikler şeklinde alev engelleyiciler salındırır.

Alev yayılma hızı kadar üretilen toplam duman da önemli bir parametredir. Ayrıca alevin yayılma hızını ölçen çok daha zorlu testler de mevcuttur. Alev geciktirici özelliklerini kazandırmak için alüminyum trihidroksit ve magnezyum hidroksit gibi maddeler eklenir. HFFR termoplastiklerin alevi södürme mekanizmaları çeşitli bölümlerde anlatılmıştır [51].



Şekil 2.6 Bir polimer yanma çevriminin şematik gösterimi

Son on yıldır, FR polimerlerinin zincir uzatıcıları veya monomerleri olarak sentezlenmesi için farklı FR tipleri kullanılmıştır. Yangın anında alev geciktiricili termoplastikler yangını temel olarak iki farklı şekilde söndürmektedir. İlki yanıcı olmayan gazların salınıp oksijensiz bir ortam oluşturarak yangını söndürmektedir. İkincisi yüzeyinin karbonlaşarak yanacak madde ve oksijen arasında bir set oluşturup oksijensiz ortam oluşturup yangını söndürmektir. Alev geciktiriciler 2. Dünya Savaşı sırasında ABD'de büyük ilgi gördü; özellikle, FR askeri kıyafetleri ve havacılık kaplamaları son derece önemli kabul edildi. Çapraz bağlama ayrıca FR aktivitesini de iyileştirebilir; bir FR'nin fonksiyonel grupları çapraz bağlama derecesini artırma yeteneğine sahip olabilir. Mekanizmalarına göre FR'ler dört kategoriye ayrılır: gaz fazı, endotermik, katı faz ve şişen FR'ler [51]

2.3 Termosetler

Termosetlerin termoplastiklerden en belirgin farkını ısıtılıp bir defa şekil verdiğinizde çapraz bağlanması ve bir daha ısıyla şekil verilememesi gösterilebilir. Ancak her ne kadar oluşan çapraz bağlar yüksek direnç ve dayanıklılık kazandırsa da düşük sıcaklıklarda kırılganlık gösterebilirler. Yapıları termoplastiklere göre serttir ve yüksek sıcaklıklara daha dayanıklıdırlar. Termoplastiklerin aksine geri dönüştürülebilir değillerdir.

Termosetlerin ve termoplastiklerin geliştirilmesi ve performansının iyileştirilmesi için günümüzde birçok araştırma yapılmaktadır ve giderek daha cazip bir araştırma alanına dönüşmektedir. Bu yüzden tezin bu kısmında termosetlerle ilgili

tartışmalara ayrıntılı olarak yer verilecek ve termoset polimerlerin fiziksel, termal ve mekanik özellikleri incelenecektir. Termosetlere örnekler verecek olursa epoksi, silikonlar, polyesterler ve poliüretan verilebilir. Termosetlerin dikkat edilmesi gereken bazı özellikler renk, doku, dielektrik sabiti, güç kalitesi, elastikiyet, erime sıcaklığı gibi özelliklerdir. Bu özellikler üretilen termosetin geçtiği prosesler ve hangi malzemelerden üretildiğiyle doğrudan ilgilidir. Tabiki tez çalışmasında olduğu gibi kullanıldığı yerdeki yaşlanma faktörleri de bu özellikleri zamanla değiştirmektedir. Kendi aralarında karşılaştırmalar yapılarak ve elektriksel, kimyasal, fiziksel dayanıma dair testler yapılarak hangisinin mevcut uygulama için iyi olacağına karar verilmektedir [52].

Termosetlerin üretiminde ve özelliklerinin belirlenmesinde polimerizasyon yöntemleri oldukça büyük bir öneme sahiptir. Örneğin XLPE üretiminde DCP ile yüksek sıcaklı ve basınçta üretilen bir XLPE ile kimyasal yollarla silan bağlu üretilen bir XLPE aynı fiziksel, kimyasal ve elektriksel özellikleri göstermemektedir.

Tablo 2.7'de çeşitli termosetlerin polimerizasyon yöntemleri gösterilmiştir. Termosetlerin üretiminde kimyasal tepkimeleri başlatmak yahut hızlandırmak için çokça katalizör kullanılmaktadır. Ayrıca çok miktarda peroksit serbest radikallerin üretilmesi için termoplastiklerin yapısına eklenerek termosetler oluşturulmaktadır. Farklı kimyasal reaksiyonların sonucunda 3 boyutlu bir yapıya ulaşabilen termosetler bu özelliği sayesinde termoplastiklerden üstün özellikler gösterebilmektedir ve daha kararlı yapılara sahip olabilmektedir [52].

Table 2.7 Bazı termoplastiklerin polimerizasyon yöntemleri [52]

Polimer ismi	Polimerizasyon mekanizması
Bakelite	Kondensasyon polimerizasyon
Doymamış polyester	Radyal polimerizasyon
Polyester	Kondensasyon polimerizasyon
Epoksi	Eklenerek polimerleşme
Poliüretan	Eklenerek polimerleşme
İsosiyanat içermeyen Poliüretan	Eklenerek polimerleşme

Termosetlerin fiziksel özelliklerini madde madde sıralamak gerekirse:

- Termoset kompozitler hem yüksek hem de dinamik sıcaklık uygulamalarında kararlı oldukları için pişirme kapları, hijyenik uygulamalar ve cihazlarda kullanım için idealdir. Bununla beraber yüksek sıcaklık dayanımları çalışma alanlarını oldukça genişletir.
- Çekme dayanımları inanılmaz yüksektir. Hafif malzemeler olmasına karşın çekme kopma dayanımları inanılmaz yüksektir. Bu özellikleri onların orta gerilim kablo yalıtkanı olarak kullanılmasının temel nedenlerinden biridir. Hatta hava araçlarında, kanat yapılarında bile kullanılmaktadır. Bazı özel uygulamalarda kullanılmak üzere mukavemetlerinde değişiklik yapılmak üzere tasarlanmaları da mümkündür.
- Termoset kompozitler, büzülmenin sıkı bir şekilde kontrol edilebileceği veya belki de tamamen ortadan kaldırılabileceği şekilde üretilebilir. Bu özellikleri düşünüldüğünde endüstride ve marine uygulamalarında kullanıma oldukça uydundur. Aynı şekilde büzülmenin yaşanmaması gereken otomotiv ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda çokça kullanılmaktadır.
- Önemli parametrelerden biri olan dayanıklılık tez çalışmasının odak noktalarından biridir. Bu bağlamda fiziksel dayanıklılığı ölçmek için sıcaklık ve nem bu dayanıklılığa etki edecek en önemli iki faktördür. Tez çalışmasında da bu yaşlandırma yapılmış ve ardından dayanıklılığı ölçmek adına çekme dayanımı ve uzama miktarı testleri yapılmıştır. Kimyasal olarak da oldukça dayanıklı olan termosetler, içeriğindeki antioksidanlar sayesinde belirli bir seviyede radyasyona da dayanıklıdır. Bu da uygulama alanlarını genişleten faktörlerden biridir.
- Bir madde, harici bir ısı kaynağının uzaklaştırılmasından sonra kendi yangınını söndürüyorsa, aleve dayanıklı olduğu söylenir. Yangına tamamen dayanıklı olduğunu söylemek bir termoset için imkansız olsa da alev geciktirici eklenmiş termosetler yangını geciktirebilir veya bazı durumlarda engelleyebilir.
- Termosetler özellikle kablo yalıtkanı olan termosetler çalışma süreleri boyunca çok çeşitli korozyona neden olacak etkilere ve kimyasallara maruz kalmaktadır. Bunlara karşı oldukça dayanıklı olmaları sebebiyle endüstriyel

tesislerde, gıda sanayisinde ve marine uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır.

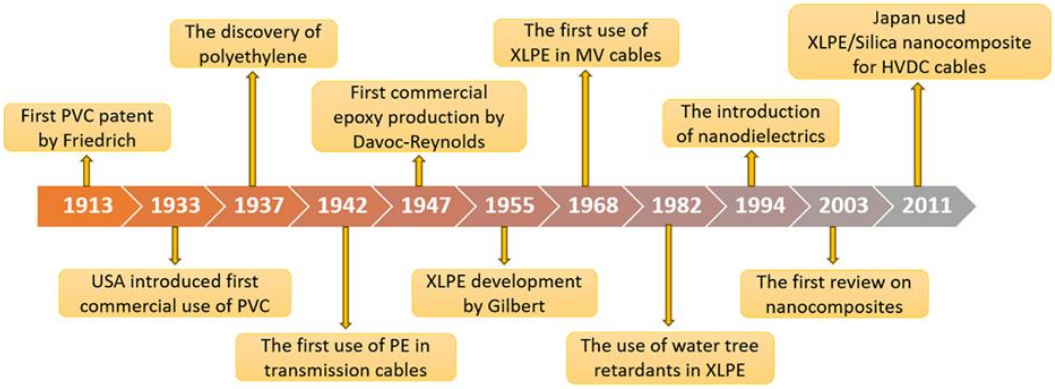
- Hepsi olmasa da bazı termosetler UV ışınlarına ve radyasyona karşı belirli ölçüde dayanıklılık göstermektedir. Poliüretan bunlardan biridir.
- **Korozyon direnci:** Plastik kompozitler, metal içermeyen türleriyle, aşındırıcı ortamlarda iyi çalışır. Çok uzun servis süresine sahiptir ve oldukça dirençlidir. Ayrıca, zamanla ve çevre koşullarıyla oluşabilecek bozulmalara karşı direnç gösterebilir.
- Tez çalışması boyunca bütün testlerde özellikle XLPE bir termoset olarak üstün özellikler göstermiştir. Yüksel kalite faktörü, düşük güç kaybı, yüksek delinme gerilimi gibi özellikler dielektrik özelliklerinin ne kadar iyi olduğunu gösteren faktörlerdir. Bu özellikleri onu orta gerilim yalıtkanı olarak vazgeçilmez hale getirmektedir.
- **Manyetik olmayan özellikler:** Kompozitler, metal içermediklerinden mıknatısların ve diğer potansiyel olarak tehlikeli elektronik bileşenlerin yakınında kullanmak için güvenlidir. Ayrıca, termoset kompozitler, radyo ve mikrodalga iletimini bozmadıkları için son teknoloji kontrol sistemleri kullanan muhafazalar için harika bir seçenektir.

2.3.1 Çapraz Bağlı Polietilen (XLPE)

Yüksek gerilim kablolarında yaygın olarak kullanılan bir yalıtkan olan çapraz bağlı polietilen (XLPE), düşük dielektrik kaybı, yüksek dielektrik sabiti, yüksek termal iletkenlik, gelişmiş termal kararlılık ve elektriksel strese karşı üstün direnç gibi çeşitli istenen özelliklere sahiptir. Her ne kadar üstün özellikleri olsa da yine de bu özellikler geliştirmeye muhtaçtır. Bu noktada nanopartiküller XLPE'nin yapısını geliştirmede önemli bir rol oynayabilir. Aynı zamanda araştırmacılara ar-ge yapılabilecek geniş bir alan açmaktadır. Çinko oksit, graften ve inorganik nanopartiküller kullanılabilmektedir. Bu nanopartiküller, geniş arayüz bölgeleri nedeniyle, küçük yükleme seviyelerinde bile çok sayıda tuzaklama alanı oluşturur. XLPE'nin dielektriksel özelliklerini kötü etkileyen bir örnek de oksitlenmedir. Bu yüzden antioksidanlar XLPE üretiminde termosetin yapısına eklenmektedir. Bu antioksidanlar serbest radikallerin termosete nüfuz etmesini engeller ve elektriksel özelliklerini korumasını sağlar. Bu kısımda XLPE için dielektrik yalıtımdaki

başlıca zorluklar, örneğin arıza voltajı gücü, elektriksel ağaç büyümesi, yapısal kusur, uzay yükü birikimi ve termal yaşlanma ele alınmaktadır [53].

Birçok özelliğiyle termoplastikleri geride bırakan XLPE ilk olarak General Electric tarafından 1960'larda tanıtılmıştır. PVC gibi termoplastiklere nazaran daha güçlü dielektrik özelliklere sahiptir. Güç kaybı, delinme gerilimi, güç kalitesi, tan delta gibi faktörlerde daha iyi performans vermektedir. Bu özellikleri XLPE'yi orta ve yüksek gerilimde vazgeçilmez bir yalıtkan haline getirmiştir. Yoğun elektrik alan dayanımı olan XLPE'nin dielektrik sabiti 2.5 civarındadır. Şekil 2.7'de kablo yalıtkanlarının tarihsel gelişimi gösterilmesidir. Bu iyi özelliklerle beraber XLPE düşük sıcaklıklarda kırılgan özellik göstermektedir [53].



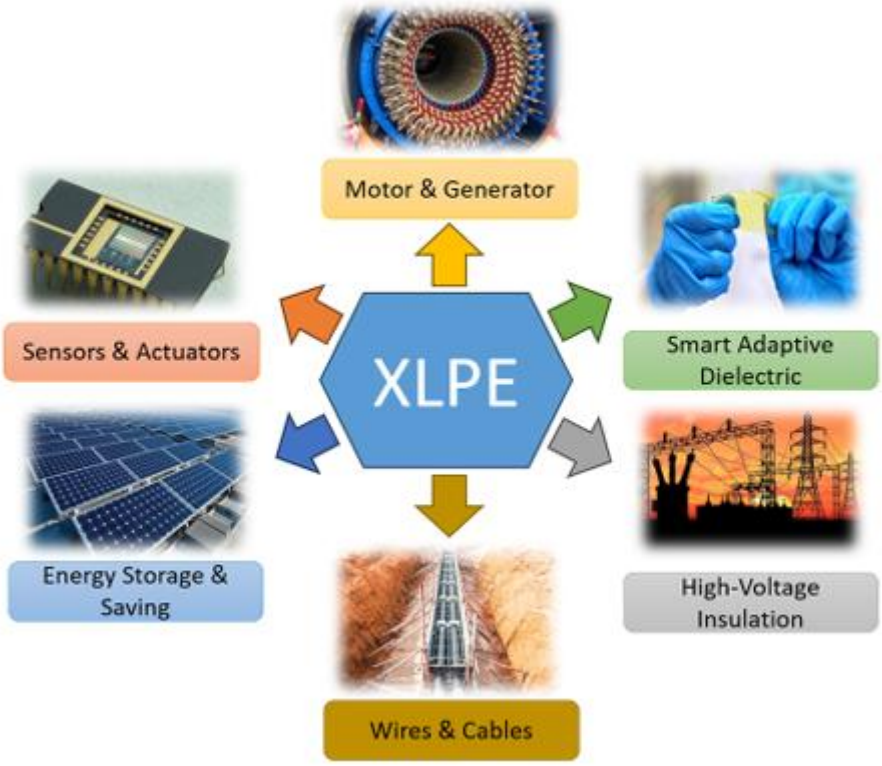
Şekil 2.7 Kablo izolasyonlarının tarihsel gelişimi [53]

XLPE'nin çapraz bağlanma metotları arasında 2 kimyasal ve 1 fiziksel metot bulunmaktadır. Tablo 2.8'de ayrıntılı olarak bu yöntemler ve yöntemlerin avantajları ve dezavantajları anlatılmaktadır. Ayrıca prosesler hakkında genel bilgi edinebilmek adına mükemmel bir tablo olmuştur. Tabloda da görüleceği gibi son ürün olarak ortaya çıkan yalıtkan bir çapraz bağlı polietilen yapısı olsa bile bunların arasında ciddi dielektriksel, kimyasal dayanım, termal dayanım ve fiziksel dayanıklılık farkı olabilmektedir. Nitekim tez çalışmasında kullanılan 2 aşamalı üretilen silan katkılı çapraz bağlı polietilen organik peroksitlerine nazaran neredeyse %20 daha kötü fiziksel ve dielektriksel dayanım göstermektedir. Yaşlandırma sonrasında bu yüzdelik dilimin daha artma ihtimali söz konusudur. Farklı bağlanmış XLPE'lerin performansının ölçülmesi başka bir çalışmanın konusudur. Burada kullanılan maddelerin her biri nihai üründe bir veya birkaç özelliği değiştirdiği için ürün seçimine ve karışım oranlarına dikkat edilmeli ve bu karışımlar tamamen uygulama amacına yönelik olarak değiştirilmelidir [53].

Tablo 2.8 XLPE çapraz bağlanma metodları [53]

	Kimyasal		Fiziksel
	Organik peroksit	Organik silan	Elektron ışınlanması
Materials	•Dikümil peroksit	•Viniltrimetoksilan •Dikümil peroksit •Antioksidanlar •Çapraz bağlama katalizörü	•Benzil dimetil ketal gibi keton bazlı maddeler
Mekanizma	•Organik peroksitlerin serbest radikaller üretmesiyle	•Reaktif silan moleküllerinin PE'ye bağlanması	•Serbest radikaller üretecek yüksek enerjili radyasyon
Proses	•4 temel üretim prosesi mevcuttur. - Engel isimli proseste her şey karıştırılır. Peroksit, stabilizer ve PE yüksek basınca maruz bırakılır -Dioplast yönteminde PE peroksitin içine ekstrüde edilir. Yüksek derecede sıcaklık ve basınç oluşturulur. Amacı peroksiti parçalamaktır -Pont a'Mousson yönteminde peroksit ve polietilen beraber ektrüde edilir. Çapraz bağlama için tuz banyosu kullanılır. Sıcaklık 300 °C civarında gerçekleşir -UHFI peroksiti parçalamak için mikrodalga ışınlarını kullanır •Operasyon basıncı 15-20 kg/cm2 •Ekstrüzyon sıcaklığı 250-350 °C	• Üretim çeşitleri isimlerine göre ikiye ayrılmaktadır. •Tek bir prosesin mevcut olduğu üretim çeşidine Monosil denmektedir. Bütün ürünler karışıma atılır ve ektrüde edilir • İki aşamada üretimin ismi Sioplas'tır. Önce PE zincirleri üzeri silan kaplanır daha sonra sisteme katalizör eklenir ve bütün malzemeler karıştırılır •Kürleme su veya su buharıyla 70-90 °C'de yapılır	•Yüksek radyasyona maruz bırakılır. Beta veya gama ışınları ya da UV radyasyonu kullanılır
Avantajlar	• %90'a kadar çapraz bağlanma • Malzeme kalınlığında sınırlama yoktur	• Monosil için prosesi esnektir ve yüksek miktarda üretimlerde maliyet düşüktür • Sioplas için geniş uygulama alanı mevcuttur ve malzemeleyi güçlendirmek için takviye eklenebilir	• Kontrol edilebilir ışınım dozları
Dezavantajlar	• Yükses proses sıcaklığı ve süresi • Peroksit içeriği arttıkça kopma uzaması, akma dayanımı ve kopma gerilmesi kötüleşir	• Yüksek enerji tüketimi • Kürleme yüzünden uzun üretim süresi • Suyun XLPE'ye difüze olma riski • Çapraz bağlanma süresinin uzun olması mekanik özellikleri iyileştirir	• Yüksek ekipman maliyeti • Limitli materyal kalınlığı 1-2mm
Oluşan Ürünün Özellikleri	• C-C çapraz bağlanması Silana göre mükemmel termal stabilite, mekanik dayanım, kimyasal dayanım ve dielektriksel özellikler kazandırır	• Si-O-Si çapraz bağ yapısı C-C'a göre daha zayıftır ancak yine de iyi mekanik dayanım ve kimyasal dayanım kazandırır	• Peroksitle üretilen XLPE'lere göre termal dayanımı daha yüksektir

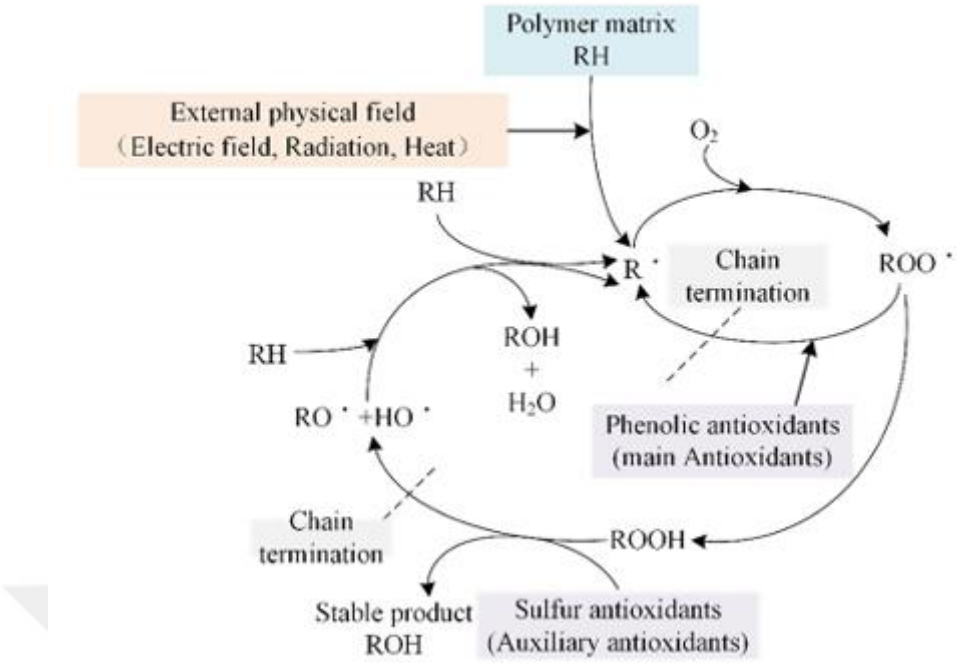
Kablo yalıtımı durumunda, çapraz bağlama öncelikle malzemenin yük altında termal kararlılığını artırmayı, işlevsel özelliklerin yüksek sıcaklıklarda bile korunmasını ve büzülmeyi azaltmayı hedefler. Bu özellikleri XLPE'yi PVC'den daha çok tercih edilen bir yalıtkan malzeme haline getirdi. PVC ve bilumum termoplastikler kablonun ısınmasıyla beraber büzüşürken XLPE sıcaklığa böyle bir tepki vermez. Bü yüzden orta ve yüksek gerilimde en çok kullanılan yalıtım malzemesi olarak XLPE'yi söyleyebiliriz. Olağanüstü yalıtım yeteneklerinin yanı sıra, bir yalıtkanın düşük dielektrik kaybına, yüksek dielektrik sabitine, yüksek termal iletkenliğe, gelişmiş termal kararlılığa ve elektriksel strese, izlemeye ve hava koşullarına karşı üstün dirence sahip olması esastır. Elektrik tabanlı aygıtlarda, kablolarda ve aletlerde polimerik malzemelerin her yerde bulunması, sektörde rekabet etmek ve gelişmek için dielektrik performansında ufak bir iyileştirmeye bile ihtiyaç duyulmasına neden olur. Şekil 2.8'de XLPE'nin kullanıldığı alanlar gösterilmiştir. Özellikle yenilenebilir enerji sistemleri ve iletim dağıtım hatlarında kullanımı tezimiz için de önemli bir faktördür. XLPE elektrik mühendisliğini ilgilendiren tarafıyla sürekli olarak araştırmaya ve incelenmeye muhtaç bir polimerdir [53].



Şekil 2.8 Elektrik güç sistemlerinde XLPE uygulamaları [53]

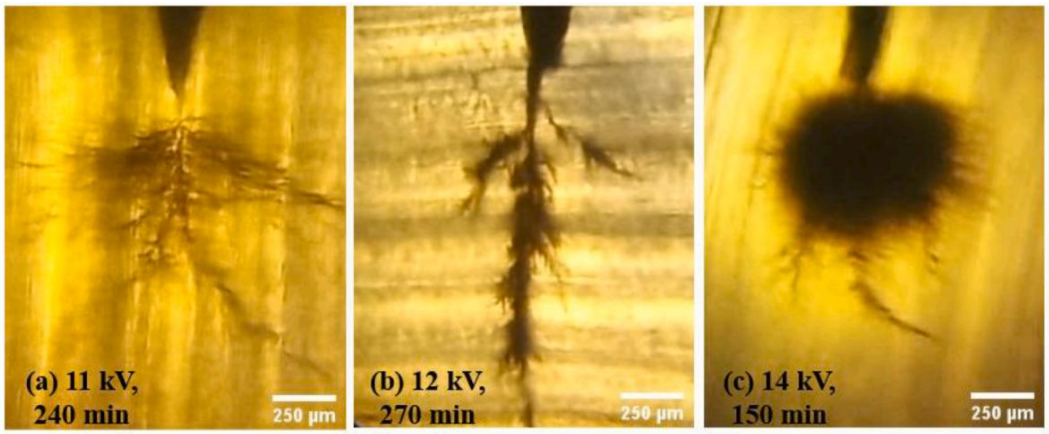
XLPE için temel sorunlardan biri de oksidasyon sorunudur. Oksidasyonun oluşması için serbest radikallere ihtiyaç vardır. Hidrojen peroksit ve O_2 gibi serbest radikaller oldukça reaktiftir. Bunların XLPE ile tepkimeye girmesi sonucu yalıtkanda bozunmalar meydana gelmektedir.

Oksidasyon polimerizasyon, üretim veya işleme sırasında ısı, mekanik kesme, metalik safsızlıklar ve radyasyon gibi çeşitli faktörlerden kaynaklanabilir. Oksidasyon bir dizi zincirleme reaksiyon şeklinde gerçekleşir ve bu zincirin kırılması için termosetin yapısında antioksidan bulunması gerekmektedir. Sürekli serbest radikallerin üretildiği ve serbest radikallerin başka serbest radikal ürettiği bu reaksiyonları etkileyen ve tetikleyen birçok faktör bulunmaktadır. UV, gama ışınları gibi radyasyon, su, su buharı, oksijen, yüksek çalışma sıcaklığı ve yoğun elektrik alana maruz kalmak XLPE için oksitlenmeyi başlatan veya tetikleyen faktörler olarak sayılabilir. Bu döngüyü anlamak adına örnek olarak E300 anti-oksidanının oksidasyon şeması Şekil 2.9'da gösterilmiştir. [53]



Şekil 2.9 E300 oksidasyon şeması

Oksidasyon haricinde XLPE'nin bu üstün özelliklerini kötü etkileyecek faktörlerden biri de ağaçlanmadır. Su ağaçlanması ve elektriksel ağaçlanma yalıtkanın direncini düşüren ve yüksek kısmı deşarjların oluşmasına, son olarak da arızaya geçmesine neden olmaktadır. Elektrik ağaçları deşarjlarla beraber büyümekte ve giderek kablo yalıtkanını daha fazla iletken hale getirmektedir. Bir noktadan sonra kısa devre yaşanıp sistem arızaya geçmektedir. Şekil 2.9'da elektriksel ağaçlanmanın elektron mikroskobundaki görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 2.10 Farklı gerilimler altında elektrik ağaçlanması (11 kV, 12 kV, 14 kV) [54]

XLPE'nin özelliklerini güvenilirliğini artıracak şekilde uyarlayarak dielektrik bozulma riskini azaltmak için önemli çabalar sarf edilmiştir. Mükemmel termal ve yalıtım özellikleriyle bilinen silikatlar, yüksek sıcaklıklarda olağanüstü performans gösterir. Ancak, kümelenmiş nanopartiküller, matris yapısındaki kusur nedeniyle yük taşıyıcı hareketini tetikleyen kısmi deşarjın (PD) toprak elektroduna ulaşmasını hızlandırır.

Geleneksel olmayan katkı maddelerinin eklenmesi, polimerin makromoleküler zincirini istenen işlevsel özellikler için manipüle edebilir. Bu ayrıntılar ayrıca, gelişmiş malzemelerin tutarlı performansını sistematik olarak elde etmek için gelecekteki yatırımları da temsil eder [53].

2.3.2 Etilen Propilen Kauçuk (ERP)

ERP, sentetik bir kauçuk türüdür ve etilenle propilenin polimerizasyonuyla meydana gelir. Çeşitli endüstriyel uygulamalarda, özellikle kablo izolasyonu, otomotiv parçaları ve conta üretiminde yaygın olarak kullanılır.

Genel Özellikleri:

- **Yalıtkan Özellikleri:** İyi bir yalıtkandır ve bu onu kablo izolasyonu olarak kullanmaya imkan sağlar.
- **Hava Koşullarına Direnç:** Ozon, ultraviyole (UV) ışık ve yaşlanmaya karşı iyi direnç gösterir, bu da onu dış mekan uygulamaları için uygun hale getirir.
- **Sıcaklık Direnci:** Çok geniş bir çalışma sıcaklığı aralığına sahiptir. XLPE'nin kırılgan olduğu düşük sıcaklıklarda bile çalışabilmektedir. 140 °C'ye kadar çalışma sıcaklığı vardır.
- **Kimyasal Direnç:** Asitler, bazlar ve çözücüler dahil olmak üzere kimyasallara karşı iyi direnç gösterir.
- **Esneklik:** Mükemmel esnekliğe sahiptir, bu da sızdırmazlık uygulamaları ve esnek bileşenler için faydalıdır.
- **Düşük Sıkıştırma Seti:** EPR, sıkıştırıldıktan sonra orijinal şeklini korur, bu da onu conta ve sızdırmazlık elemanları için ideal kılar.

Uygulamalar:

- Elektrik kabloları, özellikle düşük ve orta gerilim uygulamaları için.
- Otomotiv hava koşullarına karşı koruma contaları ve hortumlar.
- Çeşitli endüstrilerdeki contalar, O halkaları ve sızdırmazlık elemanları.

2.3.3 Fenolik Reçineler

Fenolik reçineler, fenol ve formaldehidin polimerizasyonu ile üretilen sentetik polimerlerdir. Genellikle kalıplanmış ürünlerde, kaplamalarda, yapıştırıcılarda ve sürtünme malzemelerinde bağlayıcı olarak kullanılırlar.

Genel Özellikler:

- **Yüksek Termal Stabilite:** Fenolik reçineler, tipik olarak 200°C'ye kadar yüksek sıcaklıklara dayanabilir, bu da onları ısıya dayanıklılık gerektiren uygulamalar için uygun hale getirir.
- **İyi Elektriksel İzolasyon:** Fenolik reçineler, iyi dielektrik özellikleri sayesinde elektriksel uygulamalarda yalıtkan olarak kullanılır.
- **Kimyasal Direnç:** Yağlar, çözücüler ve asitlere karşı dirençlidirler, bu da onları zorlu çevre koşullarında kullanmak için ideal hale getirir.
- **Sertlik ve Dayanıklılık:** Fenolik reçineler, mükemmel mekanik dayanıklılıkları ve sertlikleriyle bilinir, bu da onları zorlu koşullarda dayanıklı kılar.
- **Alev Geciktirici:** Yüksek karbon içeriği ve kimyasal yapıları sayesinde fenolik reçineler, doğal alev geciktirici özelliklere sahiptir.
- **Düşük Çekme:** Kalıplanmış fenolik reçineler, düşük çekme oranına sahiptir, bu da üretimde hassasiyeti sağlar.

Uygulamalar:

- Elektriksel yalıtkanlar ve bileşenler.
- Otomotiv parçaları, örneğin fren balataları.
- Çeşitli endüstrilerdeki yapıştırıcılar ve kaplamalar.

- Mutfak eşyaları ve endüstriyel parçalar gibi ürünler için kalıplama malzemeleri.

Fenolik reçineler, özel uygulamalar için ideal olan benzersiz özelliklere sahiptir, özellikle yüksek sıcaklıklar, kimyasallar ve elektriksel stres gibi zorlu çevre koşullarına dayanabilen dayanıklı malzemeler gerektiren endüstrilerde kullanılırlar.

3
TEST DÜZENEĞİ VE DENEYLER

Bu bölümde kablo yalıtkanları üzerinde yaptığımız testleri ve ne amaçla yaptığımız anlatılacak. Önceki bölümde kablolarda kullanılan yalıtkanları ve başlıca özellikleri anlatılmıştı. Literatürde bu özelliklerin hepsini ya da uygulamaya göre bir kısmını güçlendirmek için çeşitli nanokompozitler kullanılmış ve termoplastik malzemeler güçlendirilmiş veya türler üretilmiştir. Günümüzde bu çalışmalar hız kazanmış özellikle de yenilebilir termoplastiklerin geri dönüştürülebilir olmaları sebebiyle orta ve yüksek gerilimde kullanılması için üzerinde yapılan araştırma geliştirme çalışmaları hız kazanmıştır. Literatür özeti kısmında kablo yalıtkanlarının çok çeşitli şekillerde yaşlandırıldığını görmüştük. Bu çalışmada ise nem ve sıcaklık unsurlarına karşı yaşlandırma yapıp kablo performansını ölçmek adına deneyler yaptık. 3 temel deney düzeneği kuruldu ve aşağıdaki parametreler ölçüldü;

- Dielektrik kayıp faktörü, direnç, güç kaybı
- Delinme gerilimi
- Uzama miktarı ve kopma kuvveti

Sırasıyla bu deneyleri nasıl yaptığımız, deney düzenekleri ve deneylerin hangi standartlara uygun olarak yapıldığı gösterilecektir. Bunların yanı sıra kısacak nem ve sıcaklığın kablo üzerinde bırakığı etkilerden de bahsedilecektir.

3.1 Test Edilen Numuneler, Üretim Süreçleri ve Deney Koşulları

Tez çalışmasında 3 farklı kablo izolasyon malzemesi üzerinde testler yapılmıştır. XLPE, LDPE ve HFFR izolasyonlar teste tabi tutulmuştur ve yaşlanmamış halleriyle kıyaslanmıştır. Numuneler ulusal bir polimer tedarikçisi firmadan temin edilmiştir. Her bir numune ekstrüderin 2 mm kalınlığa ayarlandıktan sonra ekstrüde

edilmiştir. Her numune 30 cm² alanlar halinde bölünmüştür. Numunelerin teste tabi tutulduğu ortam şartları Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1 Deneylerin yapıldığı ortam koşulları

Numunelerin yaşlanmamış ve 30 cm² numuneler halinde parçalanmamış hallerini Şekil 3.2'de görebilirsiniz. Hava koşulları, nem oranı ve sıcaklık açısından oldukça idealdir. Numuneleri yağlandırdığımız kabinlerin sıcaklıkları ve nem koşulları ise şu şekildedir. Nem kabininde her yalıtkandan 10'ar adet numune bulunmakta ve numuneler %85 nem oranı ve 45 °C'de yaşlanmaktadır. Numunelerin metal raflarla bağlantısını kesmek için fırın 220 °C'ye dayanıklı fırın kağıtları kullanılmıştır. Nem kabinini Şekil 3.3'de görebilirsiniz. Termal yaşlandırma için endüstriye bir fırın

kullanılmış ve yine her yalıtkandan 10’ar numune alınmıştır. Numunelerin hepsi 100 °C’de yaşlandırılmıştır. Termal yaşlandırma fırınını Şekil 3.4’te görebilirsiniz. Yaşlandırma döngeleri 7 gündür. Her 7 günde bir numuneler alınıp deneylere sokulmuştur. Yalnızca delinme ve çekme kopma deneyleri 3 haftada bir yapılmıştır. Bu deneyleri yaptıktan sonra numuneler kullanılamaz hale geldiği için bu deneyler için alınan numuneler testten sonra çöpe atılmıştır.



Şekil 3.2 Deneyde kullanılan numuneler (XLPE, HFFR, LDPE)

Dielektrik kayıp faktörü, kayıp güç ve direnç ölçümleri her hafta yapılmıştır. Bunun için fırında bulunan özdeş numunelerden rasgele 3 adet alıp test edilmiştir. Her 3. haftada ise yine rasgele 3 numune alınıp bu deneyler yapılıp ardından delinme gerilimi testi yapılmıştır. Farklı 2 numune her 3.haftada çekme kopma testleri için alınmıştır. Numunelerin nem kabini ve fırındaki hallerini Şekil 3.3, 3.4 ve 3.5’te görebilirsiniz.



Şekil 3.3 Termal yaşlandırma fırını



Şekil 3.4 Numunelerin fırın içinde görüntüsü

Numuneler 220 °C'ye kadar dayanıklı, fırın kağıtlarının üstünde yaşlandırılmıştır. Hiçbir numune bir diğerine temas etmemektedir. Bölümler metal olduğu için metalle bağlantısını kesmenin faydalı olacağı düşünülerek yapılmıştır. Sonraki şekilde nem kabini gösterilmiştir. Onun da rafları metal olduğu için numuneler aynı şekilde muhafaza edilmiştir.



Şekil 3.5 Nem kabini

Kabinin nem oranı ve sıcaklığı ayarlanabilir. Kapağı yalnızca numune alırken açıldı. Görselde de görülebileceği gibi kapağı açıldığında nem oranı ve sıcaklık ani olarak düşmektedir. Yaklaşık 20 dakika içinde ayarlanan nem ve sıcaklığa geri dönebilmektedir.

Üretim süreçlerinden bahsedecek olursak XLPE yani çapraz bağlı polietilen PE zincirlerinin bağlanarak 3 boyutlu bir yapıya gelmesi ve birçok özelliğinin önemli ölçüde iyileşmesini sağlayan bir prosesle üretilir. Çapraz bağlamak için farklı fiziksel ve kimyasal yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler şunlardır:

- **Kimyasal Çapraz Bağlama:** Bu yöntem termal düzenliliği ve kimyasal dayanımı önemli ölçüde artıran bir yöntemdir. Polimerin zincir yapısını kırmak adına bir peroksit eklenir ve yüksek sıcaklıkta çözünen peroksit çok miktarda serbest radikal üretir. Bu serbest radikaller polimer zincirlerini kırar ve ardından polimer zincirlerinin diğer zincirlerle birleşmesiyle çapraz bağlı bir zincir oluşur.
- **Silan Çapraz Bağlama:** Teze konu numunenin çapraz bağlandığı yöntemdir. Bu yöntemde PE'ne silan bileşiği eklendir. Daha sonra malzeme neme yahut suya maruz bırakılarak çapraz bağlanır. Çapraz bağlama hızını artırmak için katalizör kullanılabilir. Bu sistemde su çapraz bağlanmaya yol açan bir zincirleme reaksiyonu başlatmak için tetikleyici faktördür. Kimyasal çapraz bağlamadan farkı ekstra bir nemle kürleme sürecine ihtiyaç duymasıdır.
- **Işınla Çapraz Bağlama:** Bu yöntemde yüksek enerji kullanılarak polietilen gama ışınları veya elektron ışınlarına maruz bırakılır. Polimerin yapısındaki zincirleri kırmaya neden olan bu işlemin ardından polimer zincirleri kendi aralarında çapraz bağlanır.

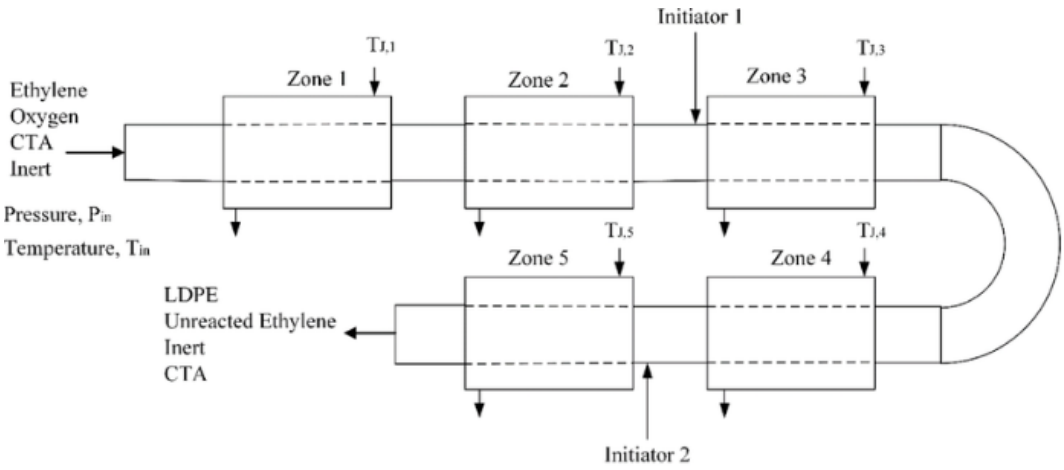
Tezde silan çapraz bağlı XLPE numuneler kullanılmıştır. Silan eklentisinden sonra katalizör de kullanılarak mini ekstrüderde numune üretilmiştir. Aynı mini ekstrüder bütün numunelerin üretiminde kullanılmıştır. Şekil 3.7'de ekstrüder görülebilir.

LDPE üretim sürecinden bahsedecek olursak. Bu numune direk granül halinde alınıp direk ekstrüderden geçirilmiştir. Ancak bilinen üretim süreçlerinden farklı bir üretim süreci olmadığı için genel olarak LDPE'nin üretim sürecini burada anlatmak yeterli olacaktır. LDPE üretim sürecinde basınç ve sıcaklık değerleri çok yüksektir, Etilen (C_2H_4) polimerleşmeyi başlatmak için 200 °C veya daha yüksek sıcaklıklara getirilir, 1500 atm civarındaki basınç altında sisteme eklenen serbest radikal başlatıcı ardından polimerleşme başlar. DCP ve başkaca peroksitler serbest radikallerin ortaya çıkmasına kaynaklık etmek için kullanılırlar.



Şekil 3.6 Mini ekstrüder

Bu karışımın reaktöre eklenmesi ve koşulların sağlanmasının ardından etilen bağları koparak ortamda serbest radikaller oluşur, Oluşan serbest radikaller diğer etilen moleküleriyle tepkimeye girer ve polimer zincirini oluşturur. Daha az kristalize olmuş ve düşük yoğunluklu polietilen bu şekilde oluşturulur. Daha sonra sistem hızlı şekilde soğutulur ve tepkimeye girmemiş etilen sistemden vakumlanarak çıkarılır. Kalan LDPE ekstrüde edilir ve levhalar haline getirilir. Sonrasında bunlar parçalanarak granül haline getirilir. Tezimizdeki LDPE de bu granüllerden üretilmiş bir LDPE'dir. Şekil 3.8'de LDPE üretim sistemini görebilirsiniz.



Şekil 3.7 LDPE üretim şeması

Halojensiz alev geciktiricili (HFFR) termoplastiklerin genel özelliklerinden önceki bölümlerde bahsedilmişti. O yüzden bu kısımda bahsedilmeyecektir. HFFR termoplastikler bir ana polimere alev geciktirici malzemenin eklenmesiyle alev geciktirici hale getirilmiş termoplastiktir. Kullanılan polimer halojen gazları içermediği için halojensiz hale getirmek için herhangi bir proses uygulanmamaktadır. Ayrıca bazı diğer fiziksel özelliklerini (elastikiyet, uzama vb.) düzenlemek için birçok katkı maddesi eklenmektedir.

Temel polimer olarak polipropilen, polietilen, poliamid ve polikarbonat gibi polimerler yaygın olarak kullanılmaktadır. Hangisinin kullanılacağı nihai olarak üretilen üründe istenen özelliklere bağlıdır. Alev geciktirici olarak çeşitli ürünler kullanılmaktadır. Başlıca sıralayacak olursak:

- **Melamin Bazlı Alev Geciktiriciler:** Melamin siyanüret gibi maddelerdir, fosfor bazlı bazı katkılarla birleşerek alev geciktirici özellik kazandırırlar.
- **Fosfor Bazlı Alev Geciktiriciler:** Fosfonatlar, organik fosfatlardır.
- **İnorganik Alev Geciktiriciler:** Alüminyum trihidrat ve magnezyum hidroksit en bilinenlerdir. Tezde kullanılan HFFR termoplastikte alev geciktirici olarak alüminyum trihidrat kullanılmıştır.

Bunlarla beraber bazı nanopartiküller (nanosilikalar vb.) de kullanılmaktadır. Bu çalışmalar devam etmektedir ve her geçen gün daha iyi termoplastikler üretilmektedir.

Bu aşamada ürünler belirlendikten sonra önce ana polimer ve alev geciktirici ürün yüksek sıcaklıkta homojen hale gelene kadar karıştırılır. Bu karıştırma ve

homojenleştirme işlemi bir ekstrüder vasıtasıyla da yapılabilir. Bu karışım homojenleştirildikten sonra diğer katkı maddeleri (renk verici maddeler, proses yardımcı maddeler vb.) karışıma eklenir. Daha sonra peletlenen malzemeler sıradan bir termoplastik gibi ekstrüde edilmeye hazır hale gelmiş demektir. Şekil 3.9'de pelet ve kablo üzerindeki HFFR termoplastiği görebilirsiniz.



Şekil 3.8 HFFR termoplastik malzeme örneği

3.2 Uygulanan Testler

Bu bölümde deney düzenekleri ve yapılan deneyler paylaşılacak. Deneyleri yaparken kullanılan cihazlar, test kapları, marka ve modelleri, çalışma şekilleri ve bu cihazlarla hangi deneylerin yapılacağı anlatılmıştır. Bütün deneyler literatürde ve uluslararası standartlarda belirtilen şekilde yapılmıştır.

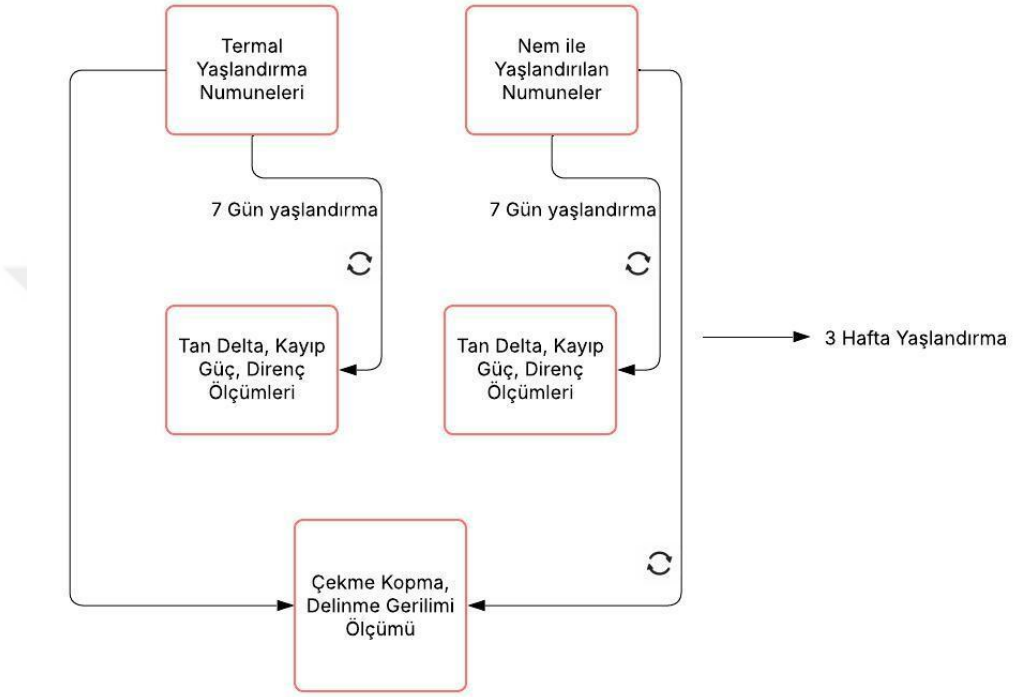
Testlerin yapıldığı ortamın koşulları daha önce gösterilmişti. Bunun dışında mümkün olduğunda test koşullarını bozmamak adına fırın ve nem kabini açılmamış ve test koşulları sabit tutulmaya çalışılmıştır.

Çekme kopma testleri için ulusal bir kablo üreticisinin Türkak tarafında akreditasyonu verilmiş cihazda ölçümler yapılmıştır.

Delinme gerilimi ve tan delta, kayıp güç, direnç testleri için Yıldız Teknik Üniversitesi yüksek gerilim laboratuvarında bulunan cihazlar kullanılmıştır. Bu cihazların kalibrasyonu TSE tarafından düzenli olarak yapılmaktadır. Buna rağmen belirtmek isterim ki test sonuçları test koşullarıyla fazlaca ilişkilidir. Yani numuneyi elektrotların arasına yerleştirdiğiniz pozisyon, kullanılan yalıtkan yağ ya da yüksek gerilim probunun bir iletken yanından geçmesi deney sonuçlarını doğrudan etkileyecektir. Bu yüzden bunlara azami derecede dikkat ederek testleri gerçekleştirdik. Tutarlı sonuçlar almamıza rağmen ben deney şartlarının

standartlarda belirtildiğinden daha iyi bir duruma getirilmesi gerektiğini düşünüyorum.

Yapılan testlerin akış şemasını görmek nelerin ne zaman yapıldığını anlamak açısından faydalı olacaktır. Şekil 3.10'da test periyotlarını ve akış şemasını görebilirsiniz. Toplam deney süresi 6 hafta olarak planlanmıştır.



Şekil 3.9 Deney Akış Şeması

3.2.1 Dielektrik Kayıp Faktörü ve Kayıp Güç Ölçümleri

Tan delta, kayıp güç ve direnç değerlerinin ölçülmesiyle ilgili literatürde çok fazla çalışma bulunmaktadır. Farklı koşullarda yaşlandırılmış yalıtkanların yaşlanma performansını ölçmek için kullanılan en yaygın yöntem olduğunu söyleyebiliriz. Bununla beraber bu ölçümlerde alınan değerleri yalıtkan durumunu belirleme ya da ömrünü belirleme gibi yöntemlerde tek yöntem olarak kullanmak ve tahminde bulunmak oldukça zordur.

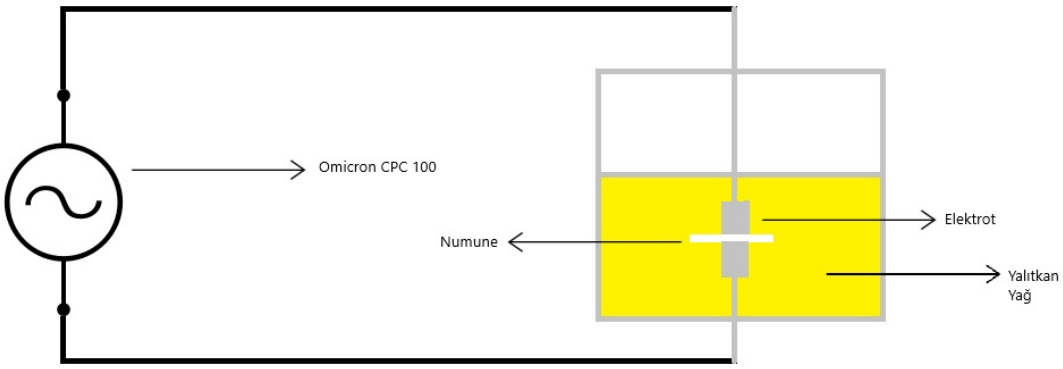
Bu yöntem çok kullanışlı ve kesinlikle yaşlanma performansı hakkında fikir vermektedir. Sürekli takip edilmesi gereken bu verilerin sayısı ve ölçüm sıklığı gerçek yaşlanma performansı hakkında kesine yakın bilgi verecektir.

Ölçümlerde Omicron CPC 100 cihazı kullanılmış ve cihaz görseli Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10 Omicron CPC 100

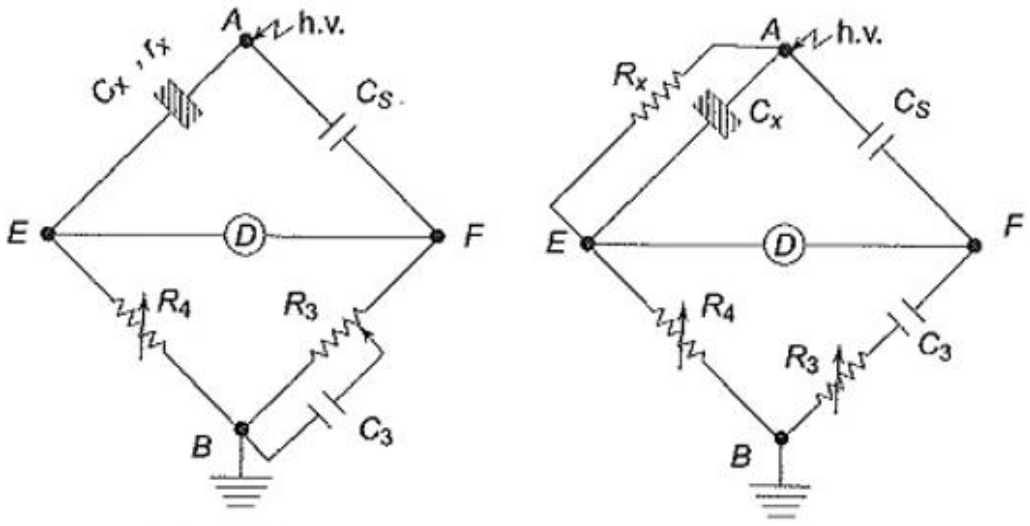
Cihazımız 50 Hz. ve katları olacak şekilde 400 Hz'e kadar ölçümler almaktadır. Gerilim seviyesi olarak 2 kV aralıklarla olacak şekilde 2 kV'den 12 kV'a kadar ölçümler alabilmektedir. Test cihazında ek olarak CPTD1 test kartı bulunmaktadır ve Schering köprüsü (Şekil 3.13) prensibiyle çalışmaktadır. Ölçümlerin yapıldığı polimetil metakrilat deney kabı 200 mm^3 hacminde olup probları kapatacak şekilde mineral yağı (trafo yağı) ile doldurulmuştur. Deney kabı şemasını Şekil 3.12'de görebilirsiniz.



Şekil 3.11 Deney kabı ve numune şeması

İki adet probdan üstteki gerilim probuyken alttaki ölçüm probudur. Sırasıyla numunelere 2 kV – 12 kV arasında 2 kV aralıklarla gerilimler uygulanmış ve 50 Hz – 400 Hz arasında 50 Hz aralıklarla ölçümler alınmıştır. Cihaz ethernet kablosuyla bilgisayara bağlanıp kendi uygulaması üzerinden kontrol edilmektedir. Çok çeşitli gerilim ve frekans aralıkları için deney yapıyorsanız deneylerin arasında bir süre beklemenizi tavsiye ediyorum. Yalıtkanı büyük bir elektrik alana maruz bırakmak şüphesiz üstünde bazı etkiler oluşturacaktır. Bunlar da ölçüm sonucuna az da olsa etki edebilir. Bu yüzden gerilim ve frekans değeri çok sık değiştirilip aynı numune üzerinde deney yapılıyorsa bu deneyler arasında bir beklemesi süresi bırakmak faydalı olacaktır.

Deneylerde kullanılan problar IEC 60243-1:2013 standartlarında gösterildiği gibi 3 mm çapında yuvarlatılmış köşeli, 25 mm yüksekliğe sahip, 25 mm çapındadır. Silindir elektrotlar birbirinin aynısı olacak şekilde üretilmiştir [55].



Şekil 3.12 Schering köprüsü parallel ve seri modelleme

Schering köprüsündeki R_x ve C_x test edilen yalıtkanın direnci ve kapasitesini göstermektedir. Diğer kapasite ve dirençler referans değeri olarak kullanılmakta ve bilinmeyen direnç ve kapasiteyi hassas bir şekilde ölçmeye yardımcı olmaktadır.

Basitçe tan delta $\tan(\delta)=I_r/I_c$ olarak söylenebilir. Yani ohmik akımın kapasitif akıma I_c'ye bölümü olarak söylenebilir. Bu değer genelde 10^{-4} ve 10^{-1} mertebelerinde değişmektedir. Cihazın ölçümleri nasıl yaptığı tezin konusu olmadığı için daha fazla ayrıntıya girilmemiştir. Ancak tan delta değerinin yükselmesi istenmeyen bir durumdur. Bu değer yalıtkandaki kayıp gücün artması, direncin düşmesi gibi değişimlerin sonucunda artmaktadır.

3.2.2 Çekme Kopma Testleri

Çekme kopma testleri özellikle kablolarda yalıtkanların performansını ölçmek için çokça yapılan testlerden biridir. Tez çalışmasında da ısı ve nemle yaşlandırılmış ve yaşlandırmaya tabi tutulmamış numunelere bu test yapılıp yalıtkanların fiziksel performansları ölçülmüştür. Burada dikkat edilmesi gereken husus numunelerin birbiriyle değil, kendi önceki durumlarıyla karşılaştırmak gerektiğidir. Zira LDPE doğası gereği çok esnek bir polimer olup kristalize yapısı düşük bir sentetik polimerdir. Dolayısıyla uzama miktarları ve çekme kuvveti HFFR ve XLPE'ye göre daha yüksek seyredebilmektedir. XLPE yapısı gereği esnemesini beklemediğimiz, ısıya ve fiziksel koşullara dayanıklı olmasını beklediğimiz bir malzemedir. Dolayısıyla uzama miktarı ve kopma kuvvetinde çok ciddi değişimler olmasını beklenmemektedir.

Deney sıcaklığı 100 °C yerine 120 °C veya üzerinde bir sıcaklık olsaydı, LDPE'deki bozunmanın XLPE'ye göre çok daha yüksek olduğunu gözlemleyebilirdik ancak çalışma sıcaklığını kullandığımız için numuneleri 100 °C'de test ettik.

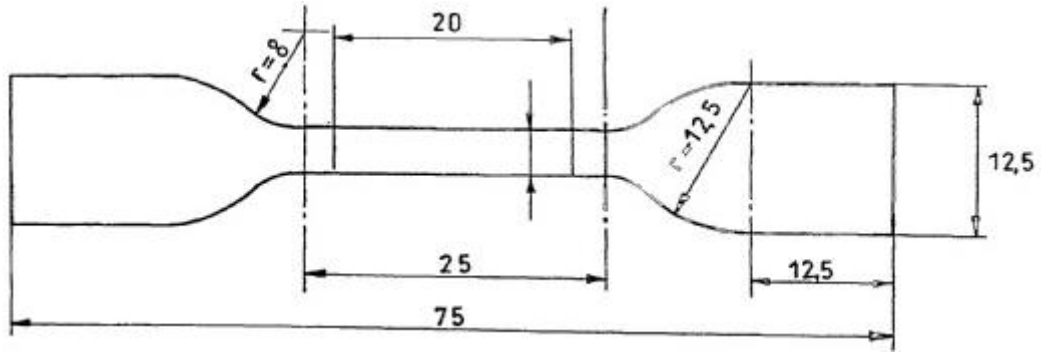
Test numuneleri IEC 60811-501 standartına uygun olarak kurdele şeklinde numuneler alındı [42]. Şekil 3.14'te alınan numuneler gösterilmiştir. Yapılan testler için ulusal bir kablo üreticisinin Türkak tarafından akredite edilmiş laboratuvarı kullanılmıştır. Test 3 hafta yaşlandırılmış numunelere uygulanmıştır. Standartta 2 çeşit numune belirtilmiş olup toplam uzunluğu 75 mm olan numune çeşidi alınıp test edilmiştir. Numune ölçüleri Şekil 3.15'te gösterilmektedir.



Şekil 3.13 Çekme kopma testi numuneleri

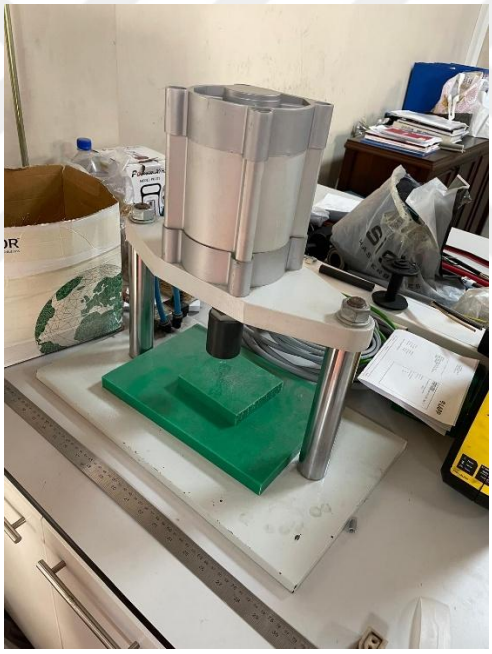
Standartta belirtilen numune çeşitleri arasında uzun olan numune seçilmiştir. Numunelerden çekme kopma numunesi çıkarmak için pnömatik bir ekipman kullanılmıştır. Aynı zamanda standarta uygun bir kalıp bulunmaktadır. Numune kalıba konulup üstünde pnömatik ekipmanın yaptığı basınçla numune

çıkarılmaktadır. Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'de pnömatik ekipman ve numune kalıbı gösterilmiştir.



Şekil 3.14 Çekme kopma testi numune ölçüleri

Her çeşit numuneden 2'şer tane alınıp yaşlandırılmamış hallerine de testler yapılmış ve toplam 18 adet çekme kopma testi yapılmıştır.

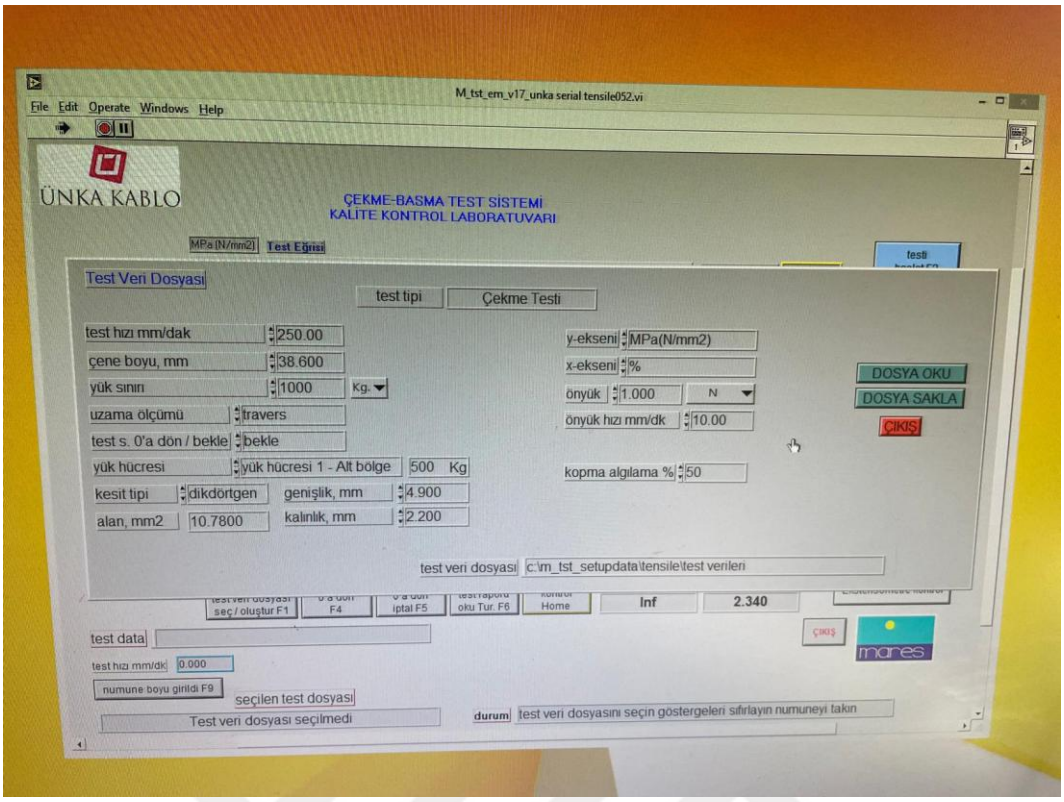


Şekil 3.15 Pnömatik ekipman



Şekil 3.16 Çekme kopma testi numune kalıbı

Numuneler Marestek markalı çekme kopma test düzeneğinde test edilmiştir. Test düzeneği bilgisayara bağlıdır ve teste bağlanmadan önce kalıpla çıkarılmış numuneler test düzeneğinde tutacaklara uçlarından yerleştirilir. Makinenin tutma kolları sabit olduğu için uzamayı %100 hassasiyetle ölçmektedir. Numune yerleştirildikten sonra bilgisayara ortadaki ince kısmın kalınlığı ve eni mm cinsinden girilir. Şekil 3.18'deki ekranda kalınlık ve genişlik kısmına değerler girildikten sonra F9 tuşuna basarak test başlatılır.



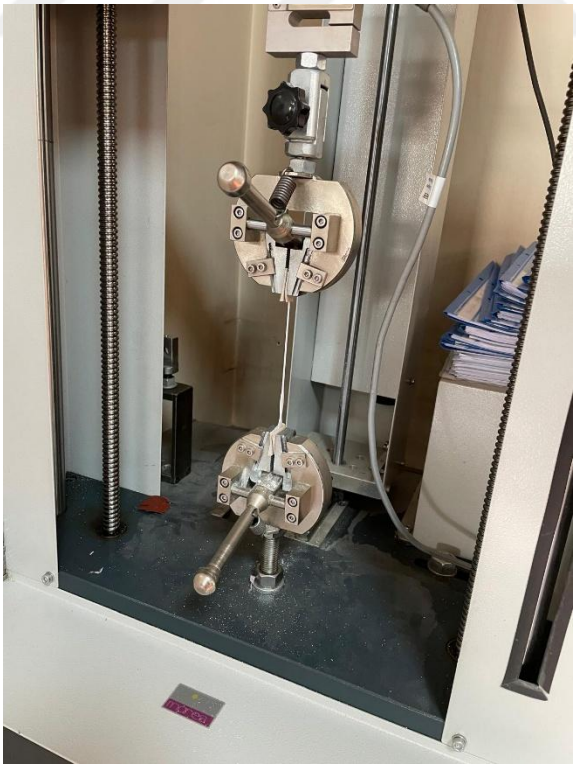
Şekil 3.17 Numune ölçülerinin girildiği arayüz

Aşağıdaki tutacak sabit dururken üstteki tutacak numuneyi yukarı doğru çekip aynı anda bilgisayar ekranına o anki çekme kuvvetini MegaPascal (MPa) cinsinden yansıtmaktadır. Aynı şekilde uzama miktarını da yüzde cinsinden göstermektedir. Şekil 3.20'de test anı gösterilmektedir.

Alınan değerler sonraki bölümde paylaşılacak ve değerlendirme yapılacaktır.



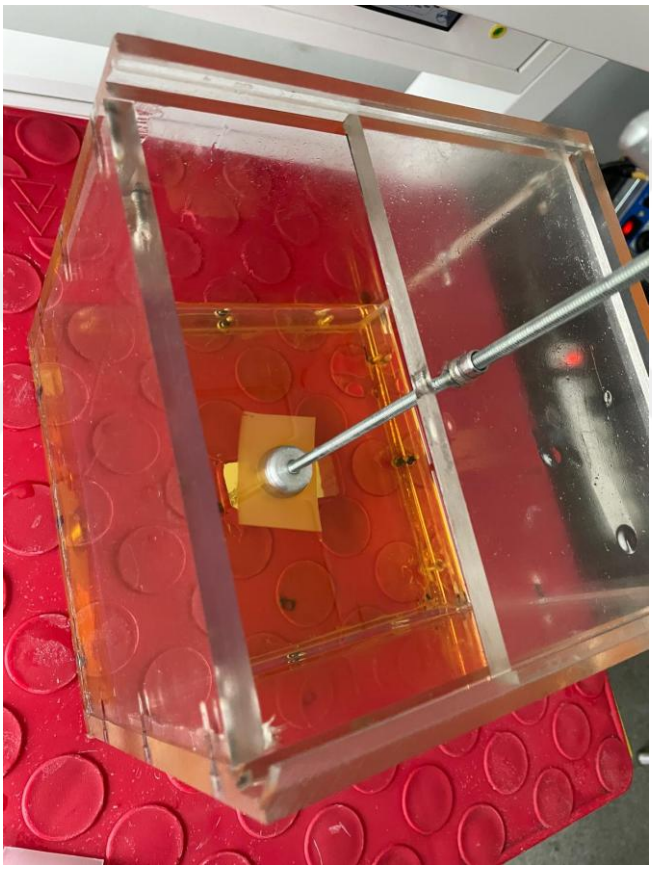
Şekil 3.18 Çekme kopma test cihazı tutacakları



Şekil 3.19 Çekme kopma test anı

3.2.3 Delinme Gerilimi Testleri

Delinme gerilimi testleri literatürde sıkça karşılaşılan ve yalıtkanın dielektrik performansını değerlendirmede kullanılan temel testlerden biridir. Bu testte de tan delta testinde kullandığımız probları ve test kabını (Şekil 3.21) kullanacağız. Gerilim üretmek için Şekil 3.22'da bulunan Hubbell'ın Hipotronics yağ test cihazı kullanıldı. Toplam 90 kV'a kadar gerilim üretebilen cihazın gerilim problarını test kabımızdaki probların ucuna bağlayarak testi gerçekleştirdik.



Şekil 3.20 Delinme gerilimi test kabı

IEC 60243-1'de belirtilen hızlı yükseliş testi yöntemi kullanılmıştır. Her ne kadar cihazımız 2 kV, 3 kV aralıklarla gerilimi yükselterek ölçüm yapabiliyor standart buna müsaade ediyor olsa bile, daha hassas ölçüm alabilmek için yine standartın izin verdiği 500 V/sn artış hızı kullanılmıştır [55].



Şekil 3.21 Delinme gerilimi test cihazı kullanıcı paneli

Bu teste 3 hafta bir tekrarlanmıştır. Zira kullanılan numuneler testten sonra imha edilmek zorundadır. Numunelerimiz 2 mm kalınlığında olduğu için delinmesi özellikle XLPE için zor olmuştur. XLPE numunelerinde yapılan testlerde yağ delindiği için XLPE numunelerini delinme gerilimi testine tabi tutamadık. Bu yüzden bu testi yapmak için 1mm kalınlığında numuneler kullanılması çok uygun olacaktır. Üretim süreçlerinde hata olmamış iyi durumdaki bir XLPE 40 kV/mm'ye kadar delinme gerilimlerine dayanabilir. Bu seviye test için çok uygun olacaktır. Ayrıca aynı yağın sürekli kullanılması sonucu yağın sürekli delinmesi veya yüksek elektrik alana ve sıcaklığa maruz kalmasıyla birlikte yağ performansında bir düşüş gözlemlenecektir. Bunun için testi tekrar ederken çok fazla yağ delinimi yaşıyorsanız ve sayısı giderek artıyorsa yağı değiştirmeniz iyi olacaktır.

Delinme gerilimi ölçümüyle ilgili farklı yöntemler de bulunmaktadır IEC 60243-3'de aynı büyüklüğe sahip gerilim darbelerinden 3 tane yalıtkana uygulanmakta ve

en az 2 tanesine dayanıyorsa yalıtkan testten başarılı olarak geçmiş sayılmaktadır. Bu test için başlangıç değerini iyi belirlemekte fayda olacaktır. Tahmini delinme gerilimi değerinin %70'i bir gerilimde başlanmalıdır [56].

Başkaca ölçüm yöntemleri de mevcuttur ancak tezde kullanılan yöntem en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir ve bir yalıtkanın delinme dayanımı ölçmek için en uygun yöntemlerden biridir. Bu yüzden bu kısımda bu yöntemler anlatılarak yetinilmiştir.

4
DENEY SONUÇLARI VE ANALİZLER

4.1 Dielektrik Kayıp Faktörü ve Kayıp Güç Deney Sonuçları

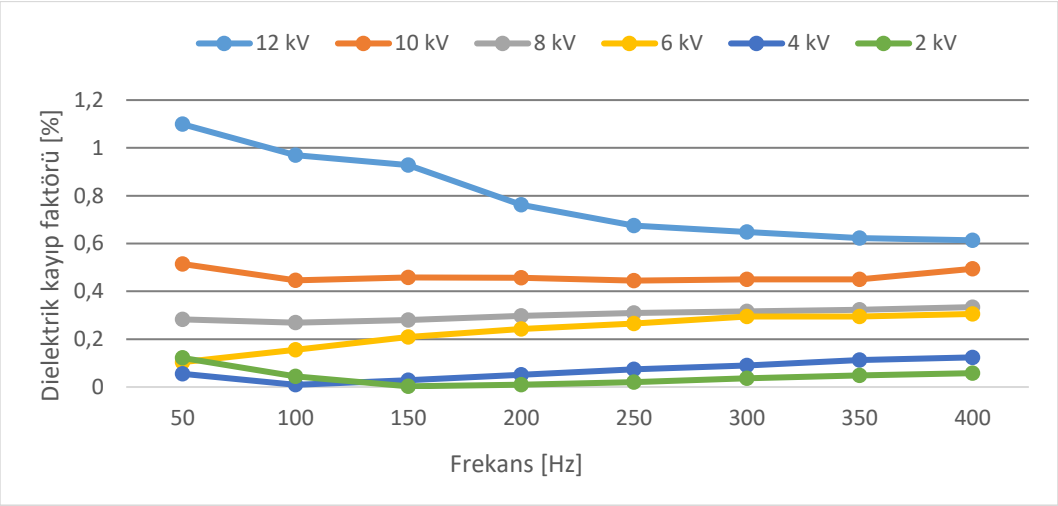
Bu bölümde yaşlanma öncesi ve yaşlanma sonrası deney sonuçları değerlendirilecektir. Her ne kadar yaşlandırılmış bir numunenin dielektrik performansının düşmesini beklesek bile, her zaman bu şekilde olmamaktadır. Örneğin XLPE buharda çapraz bağlanan bir polimerdir, dolayısıyla nem kabinine konan bir XLPE eğer çapraz bağlanmasını tamamen bitirmemişse kabinde çapraz bağlanmaya devam edebiliriz. Bu da yalıtkan performansının artmasına neden olabilir.

Literatürde yaşlanmayla beraber dielektrik kayıpların arttığını, yalıtkan direncinin düştüğünü ve delinme geriliminin arttığını görüyoruz. Nihai olarak bunlar olacak olsa da yaşlandırmanın belli noktalarında 2 periyotluk ölçümler arasında bir gerileme görülmeyebilir. Bunlar genellikle ölçümle ilgili olmakla beraber, malzeme gerçekten birkaç periyot boyunca aynı performansı gösterebilir.

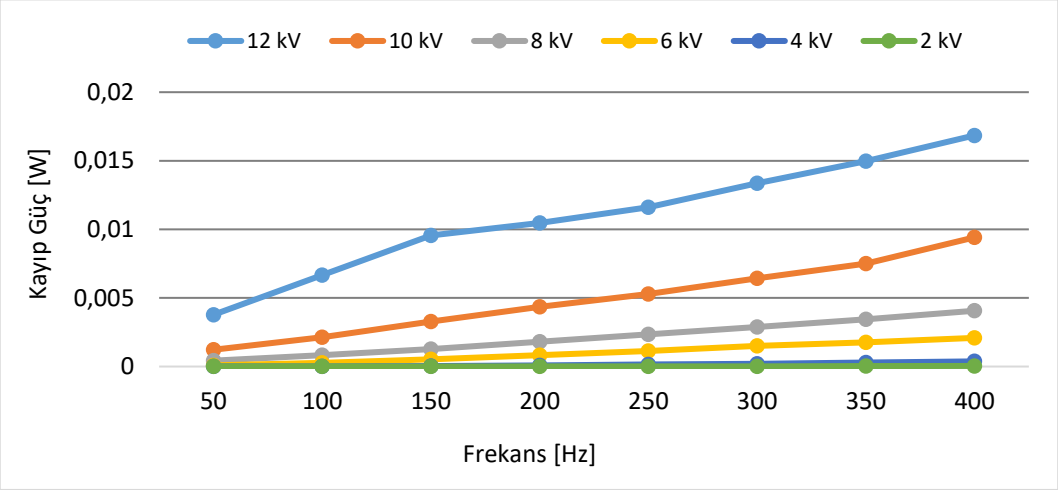
4.1.1 XLPE Deney Sonuçları

XLPE günümüzde OG ve YG kablolarda en yaygın kullanılan yalıtkandır. Doğal olarak en yüksek performansı ve stabiliteyi gözlemlemeyi beklediğimiz yalıtkan XLPE olmuştur. Aşağıda sırasıyla yaşlanma öncesi ve yaşlanma sonrası dielektrik kayıp faktörü grafiklerini görebilirsiniz.

Bütün numuneler ekstrüderin 2 mm kalınlık ayarında ekstrüde edilmiştir. Buna rağmen çapraz bağlanma sonucunda numunelerin kalınlıkları değişiklikler göstermiş olabilir. Değerler ölçüm alınan değerlerin ortalamasıdır. Örneğin 3 numuneden dielektrik kayıp faktörü ölçüldüyse, 3 değerin aritmetik ortalaması alınıp dielektrik kayıp faktörü değeri bulunmuştur.



Şekil 4.1 XLPE yaşlandırma öncesi dielektrik kayıp faktörü



Şekil 4.2 XLPE yaşlandırma öncesi kayıp güç

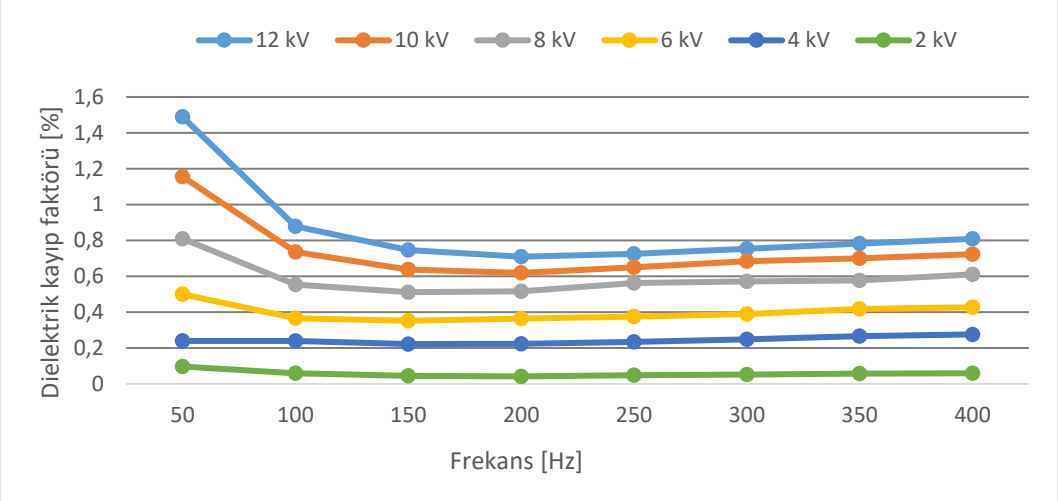
Yalıtkanın gösterdiği rezistif direnç frekans arttıkça ciddi düşüşler göstermesine rağmen kapasitif direnç frekansla ters orantılı olarak rezistif dirence göre daha az düşüş göstermektedir. Bunun sonucu olarak dielektrik kayıp faktörü frekans arttıkça düşüş göstermiştir. XLPE için bu değerlerin yaşlanma öncesinde alınması çalışma yaptığımız XLPE'nin kalitesi hakkında bize fikir vermektedir. Direkt olarak dikümil peroksit ile yüksek sıcaklık ve basınçta çapraz bağlanmış XLPE'lere göre silan bağlı XLPE'ler daha kötü performans göstermektedir. Ancak çalışmanın amacı aynı çalışma şartlarında XLPE ve diğer 2 termoplastiğin performansını karşılaştırmaktır. Dolayısıyla XLPE'nin zaman içerisindeki değişimi yani bozunma süreci bizi daha çok ilgilendirmektedir. Aşağıdaki formülde kapasitif direncin frekansla ilişkisi gösterilmiştir.

$X_c = 1 / j*\omega*c$ (4.1)

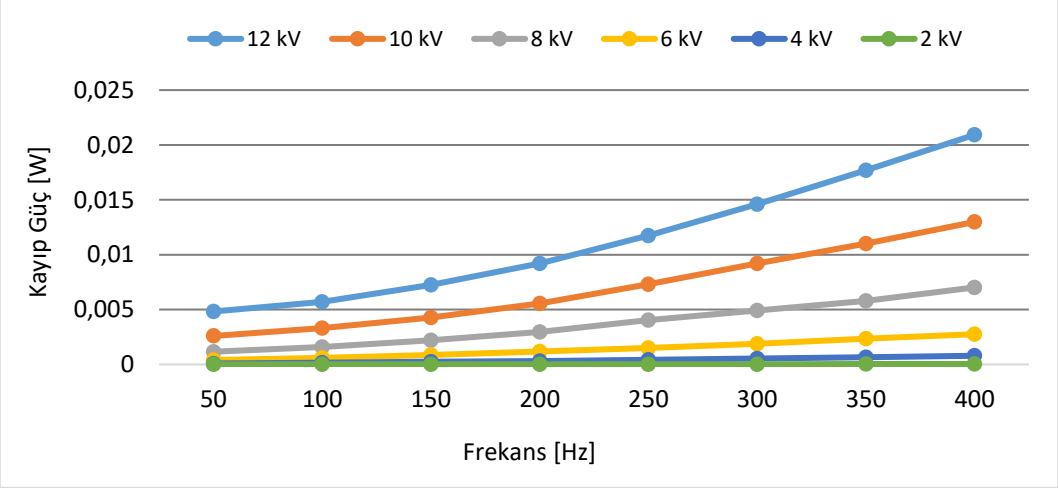
$X_c = 1 / j*2*\pi*f*c$ (4.2)

Burada X_c kapasitif direnç, ω açısal frekans, c sığayı, f frekansı temsil etmektedir.

XLPE 1. Hafta deney sonuçları aşağıdaki gibidir.

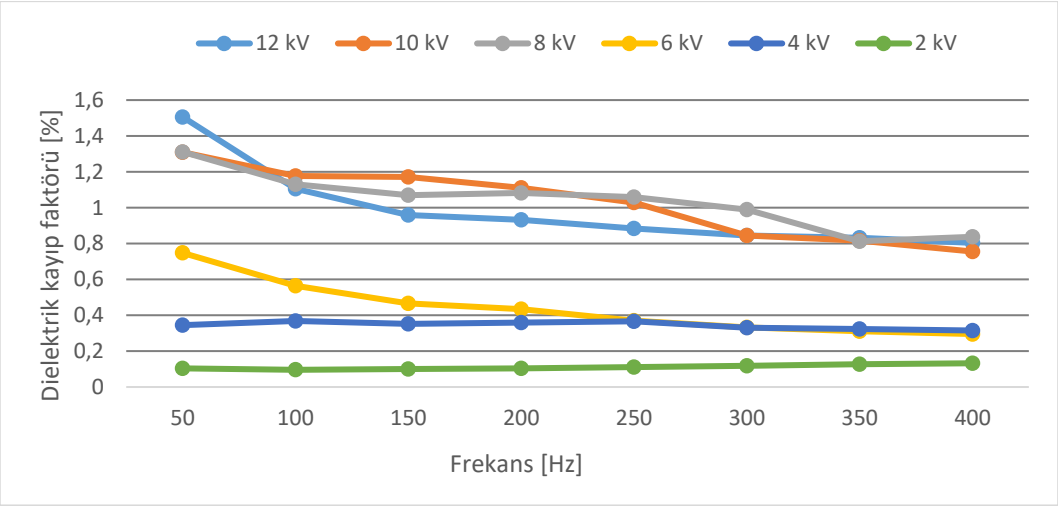


Şekil 4.3 XLPE dielektrik kayıp faktörü (Termal 1. hafta yaşlandırma sonuçları)

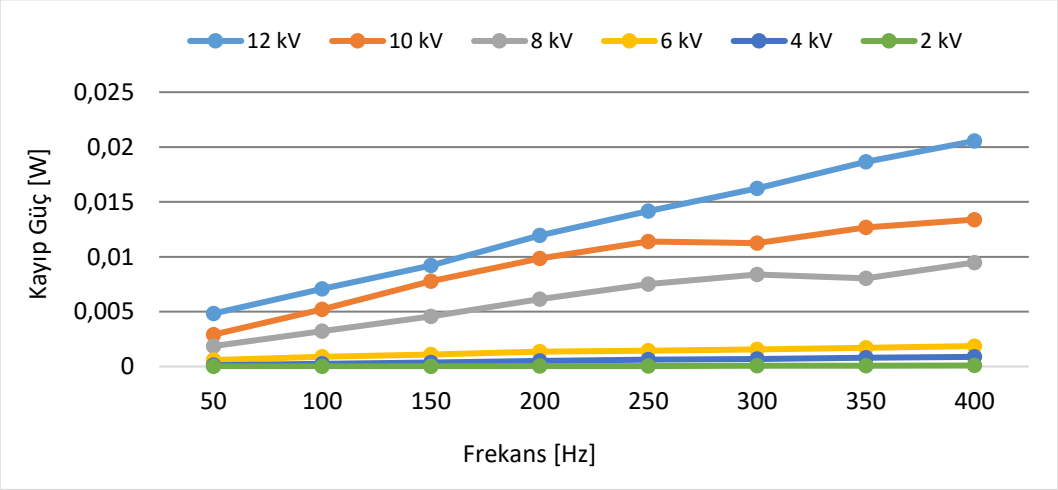


Şekil 4.4 XLPE kayıp güç (Termal 1. hafta yaşlandırma sonuçları)

Dielektrik kayıp faktörü 12 kV gerilim altında 50 Hz'de %1,1 seviyesinden %1,5 seviyesine çıkmıştır. Bununla beraber aynı gerilim ve 400 Hz frekans altında 17 mW mertebesinden 22 mW'a çıkmıştır. Özellikle en yüksek değişimlerin olduğu ve değişimin bariz gözlemlenebildiği 12 kV mertebesinde gözlem yapmak bizim için daha büyük önem arz etmektedir. Sonuçların değerlendirilmesi bölüm 4.4'te yapılacaktır. İlk hafta sonundaki nem etkisi aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir.



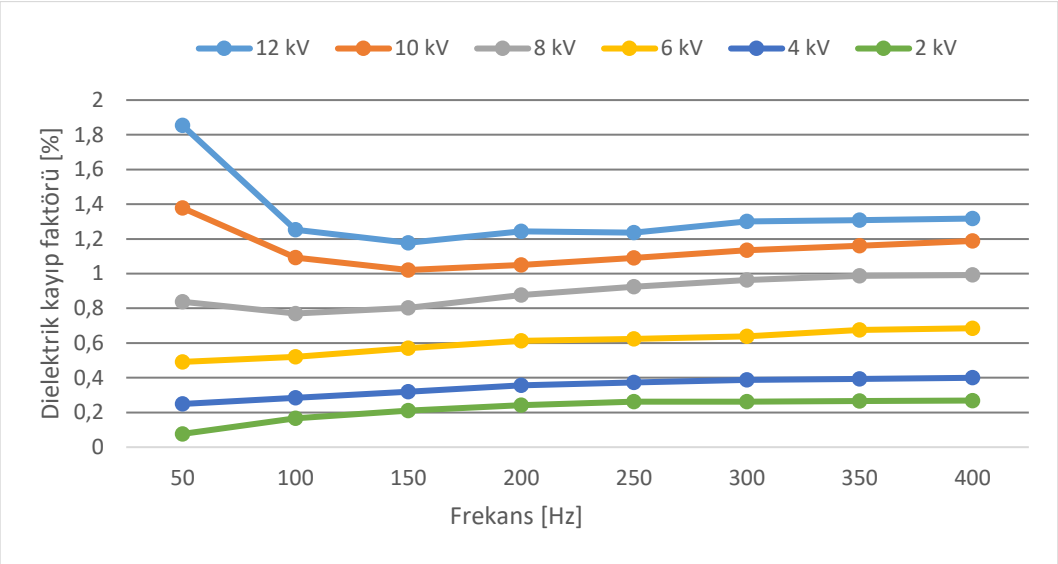
Şekil 4.5 XLPE dielektrik kayıp faktörü (Nem 1. hafta yaşlandırma sonuçları)



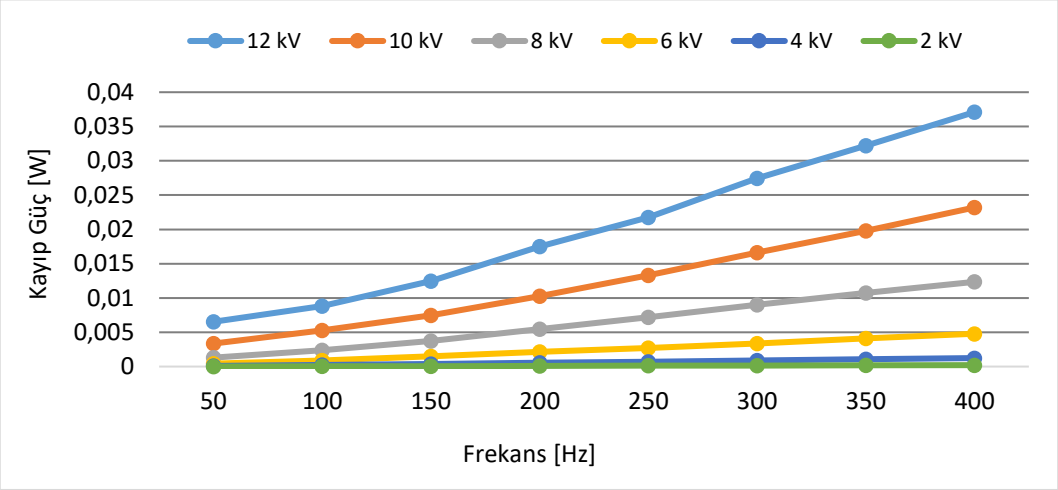
Şekil 4.6 XLPE kayıp güç (Nem 1. hafta yaşlandırma sonuçları)

Dielektrik kayıp faktörü değerlerine baktığımızda XLPE'nin nemden sıcaklıkla aynı oranda etkilendiğini söyleyebiliriz. Bu etkinin haftalar içinde aynı kalma olasılığı tabii olarak pek mümkün olmayacaktır. Çünkü nem kabininde oksidasyonu hızlandıracak birkaç faktör bir arada bulunmaktadır. Bunlar sıcaklık, nem, oksijen olarak sıralanabilir. Bunların XLPE'ye nüfuz etme şekli ve dielektrik özellikleri nasıl değiştirdiği yine bölüm 4.4'te anlatılacaktır.

Dielektrik kayıp faktörü %1,5 sevilerine gelmiş durumda en yüksek değerine 12 kV 50 Hz'de ulaşmıştır. Kayıp güçte ise 20 mW seviyeleri görülmüştür. 2. Hafta sonuçları aşağıda paylaşılmıştır.

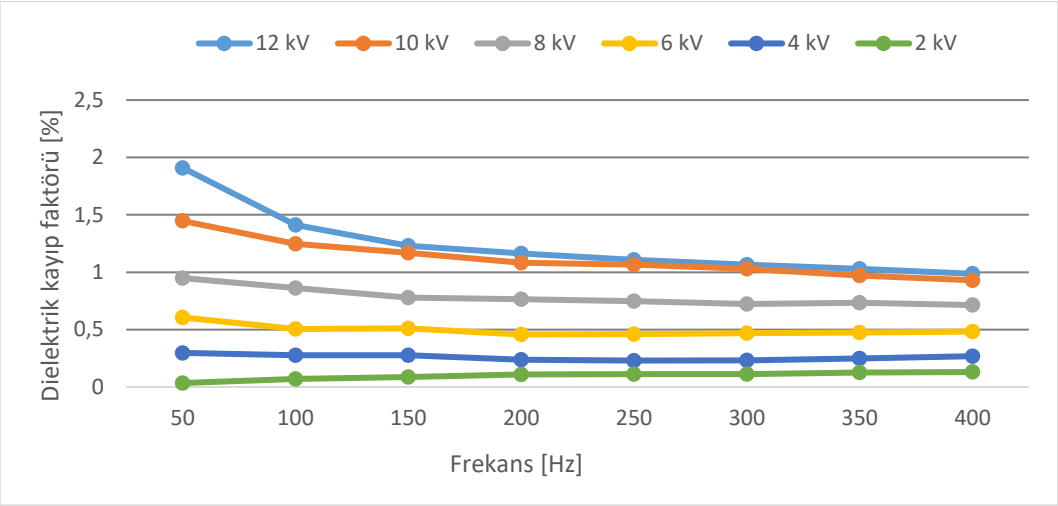


Şekil 4.7 XLPE dielektrik kayıp faktörü (Termal 2. hafta yaşlandırma sonuçları)

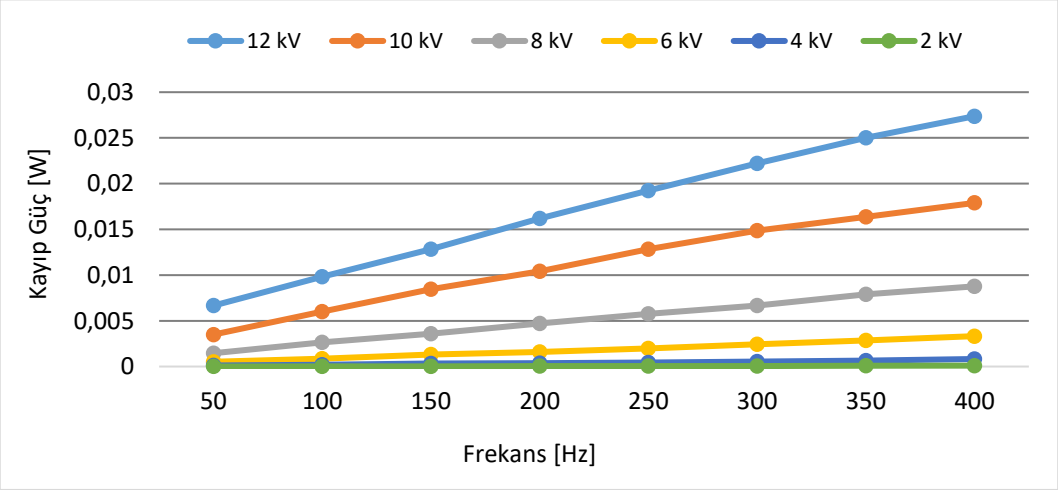


Şekil 4.8 XLPE kayıp güç (Termal 2. hafta yaşlandırma sonuçları)

2. haftanın sonunda kayıp güç değerleri 12 kV 400 Hz civarında 37 mW seviyesine yükselmiştir. Dielektrik kayıp faktörüyse 12 kV 50 Hz seviyesinde %1,9 olarak ölçülmüştür. Dielektrik kayıp faktöründe önceki haftaya göre %0,3-0,4 gibi bir ilerleme söz konusudur. Bu noktadan sonra XLPE'nin değerlerinin her hafta daha kötüye gitmesini bekliyoruz. Zira üretimden kaynaklı belirli bir nem tutmuş olsaydı, 100 °C'de kuru ortamda bunların malzemeden uzaklaşması durumunda performansının iyileşmesi gözlemlenebilirdi. 2 hafta sonucunda böyle bir durumun olmadığını ve XLPE'nin dielektrik kayıp faktörünün sürekli olarak arttığı gözlemlendi. Nem etkisi 2. hafta sonuçları aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir.

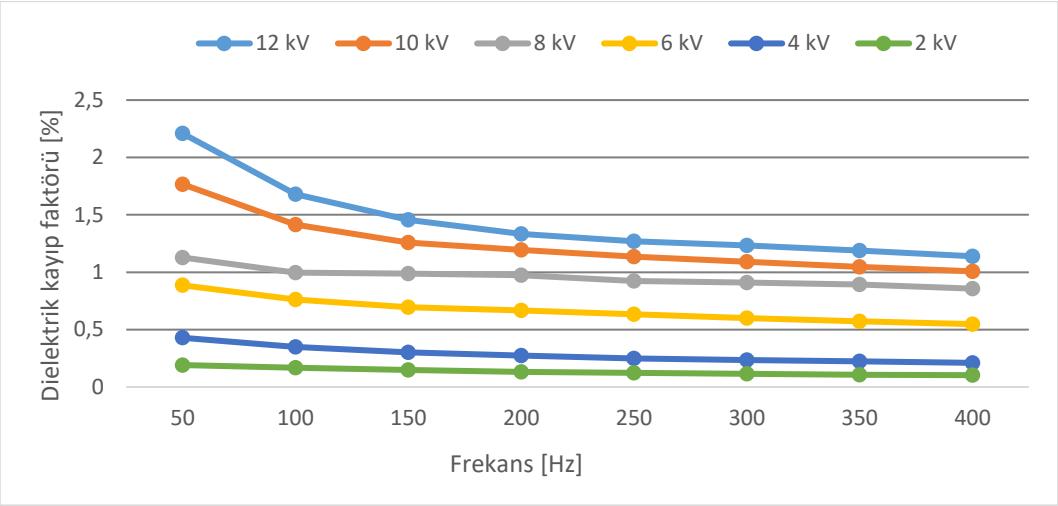


Şekil 4.9 XLPE dielektrik kayıp faktörü (Nem 2. hafta yaşlandırma sonuçları)

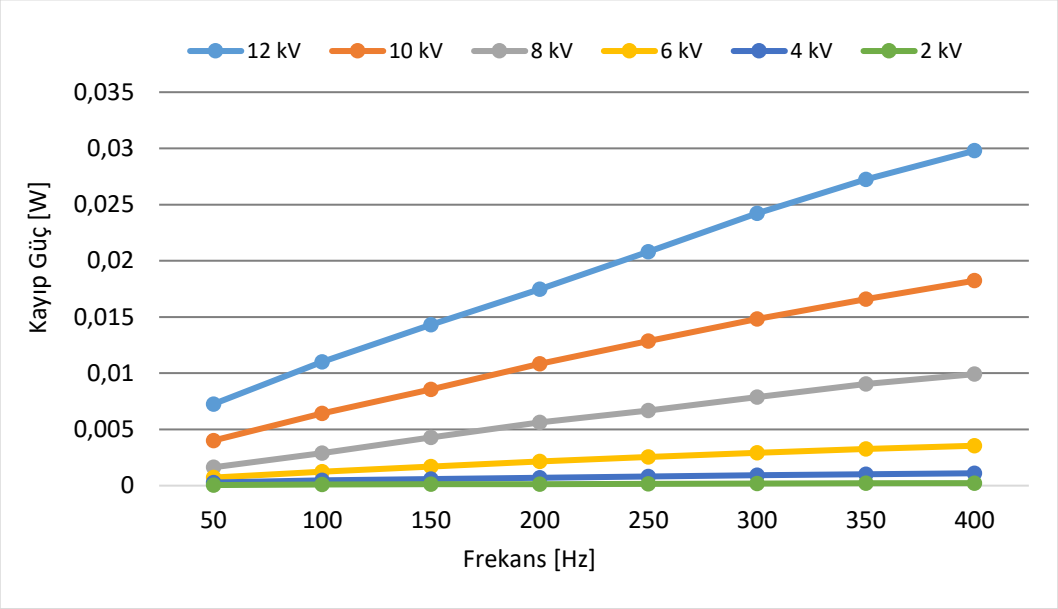


Şekil 4.10 XLPE kayıp güç (Nem 2. hafta yaşlandırma sonuçları)

2. hafta sonunda kayıp güç değerlerinin 12 kV 400 Hz'de 20 mW seviyesinden 27 mW seviyesine yükseldiğini görmekteyiz. Dielektrik kayıp faktörüyse 50 Hz 12 kV'ta %1,9 seviyesine çıkmıştır. 2 haftanın sonunda dielektrik kayıp faktörü açısından neredeyse aynı oranda etkilendiğini gözlemlenmiştir. Buna rağmen kayıp güçte aynı benzerlik söz konusu olmamıştır. Nem yaşlandırmasında kayıp güç termal yaşlandırmaya göre 10 mW daha az artış göstermiştir. 3. hafta termal yaşlandırma sonuçlarıyla aşağıda verilmiştir.

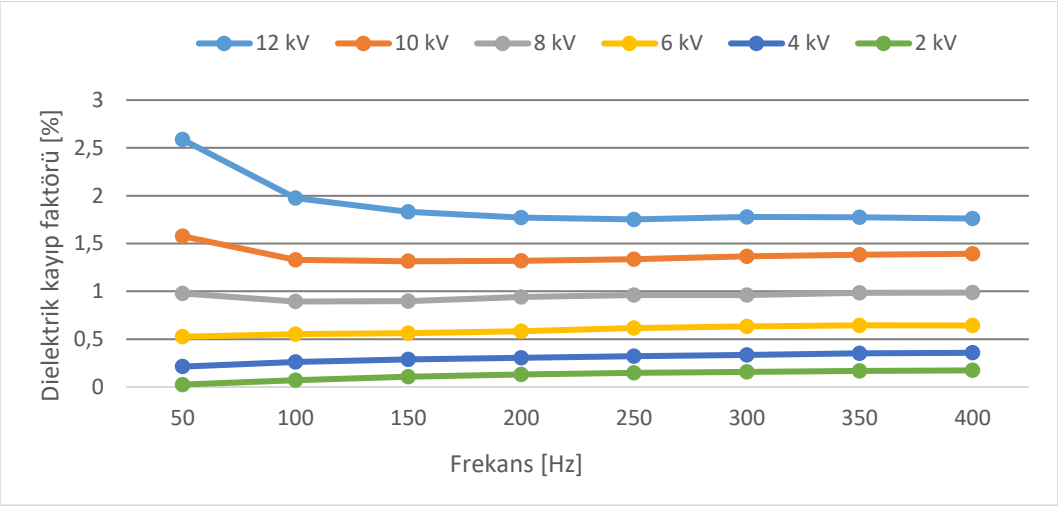


Şekil 4.11 XLPE dielektrik kayıp faktörü (Termal 3. hafta yaşlandırma sonuçları)

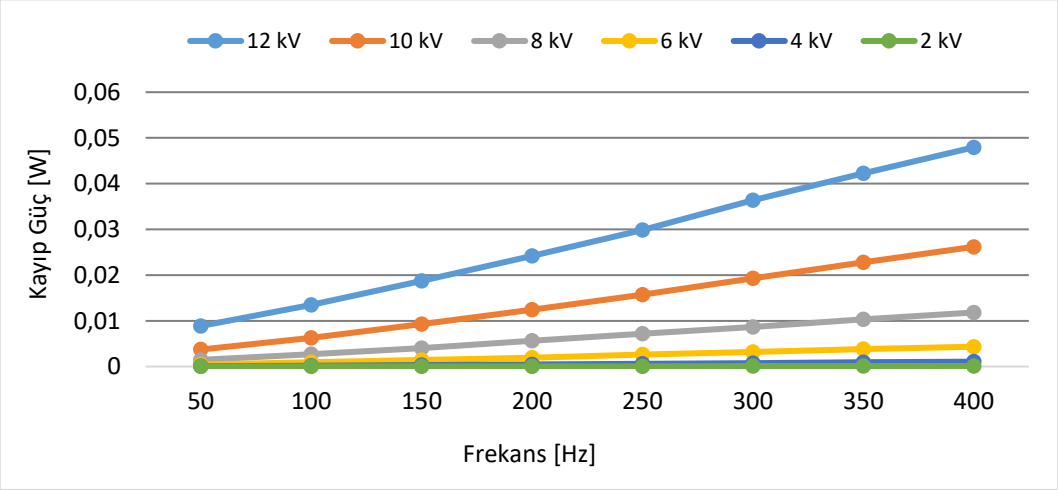


Şekil 4.12 XLPE kayıp güç (Termal 3. hafta yaşlandırma sonuçları)

3. haftanın sonunda en yüksek olduğu noktada yani 12 kV 50 Hz'de dielektrik kayıp faktörü %2,25 seviyelerine yükselmiştir. Kayıp güç ise 12 kV 400 Hz mertebesinde 30 mW seviyesine düşmüştür. Normal şartlarda artmasını beklemekle beraber bunun ölçüm hatası olabileceğini de göz ardı etmemek gerekir. 3. hafta nemle yaşlandırılmış numunelerin değerleri aşağıdaki grafikte verilmiştir.

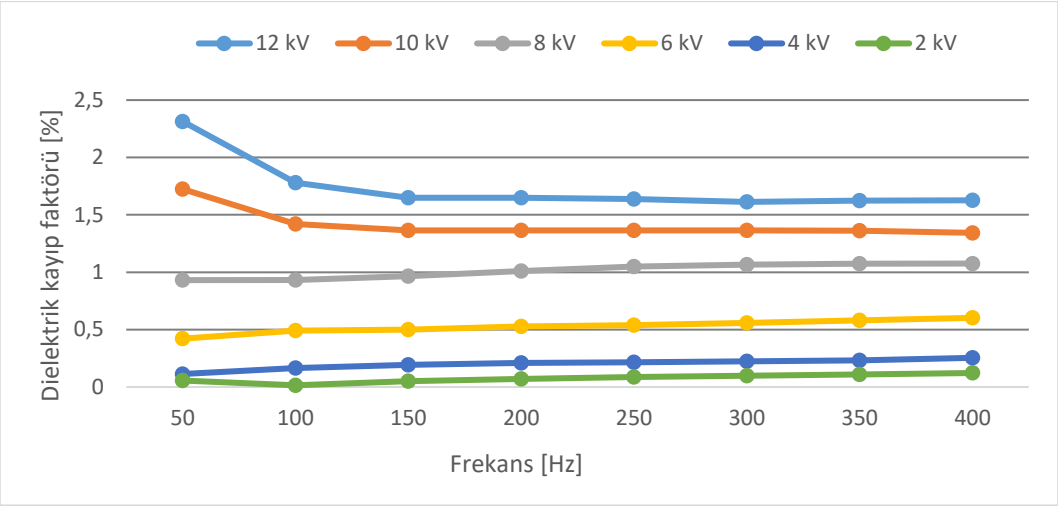


Şekil 4.13 XLPE dielektrik kayıp faktörü (Nem 3. hafta yaşlandırma sonuçları)

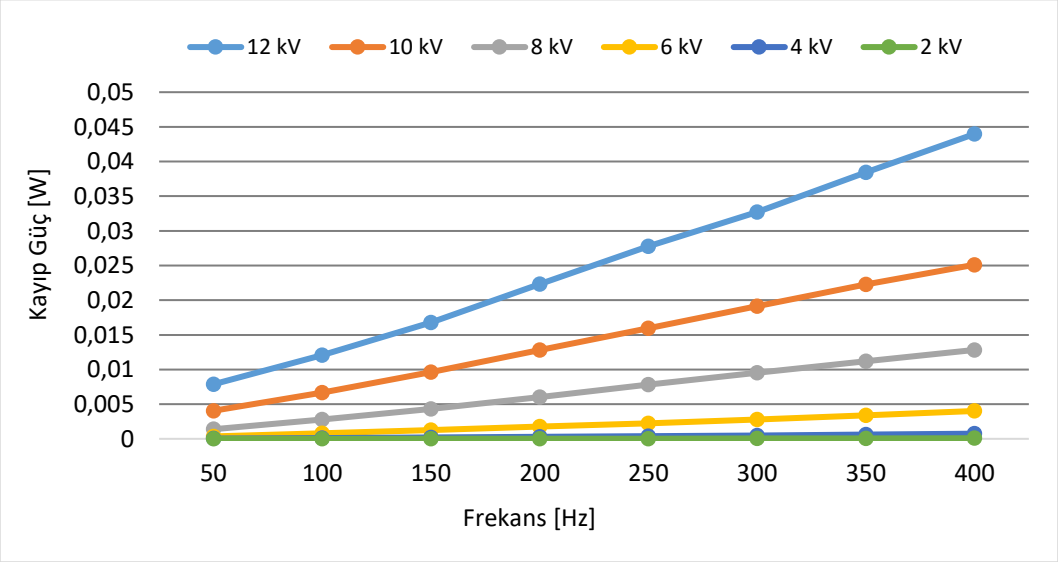


Şekil 4.14 XLPE kayıp güç (Nem 3. hafta yaşlandırma sonuçları)

3. hafta sonunda nemin kayıp güç üzerinde daha etkili olduğunu görüyoruz. Aynı şekilde dielektrik kayıp faktörü değeri de %2,6 seviyesinin üstüne çıkmış durumdadır. Nem kabininin sıcaklığı 45 °C'dir. XLPE'nin hidrotermal bir yaşlanmaya maruz kaldığı söylenebilir ancak bu XLPE için çok düşük sıcaklıklardır. Bu yüzden sıcaklık etkisinin bu sonuçta daha az etkisi olduğu söylenebilir. Nemin XLPE içerisine nüfus etmesiyle beraber malzemenin iletkenliğini artırıp dielektrik kayıp faktörü değerlerini ciddi şekilde etkilediğini söylenilebilir. 4. hafta termal yaşlandırma sonuçları ile devam edilecektir.

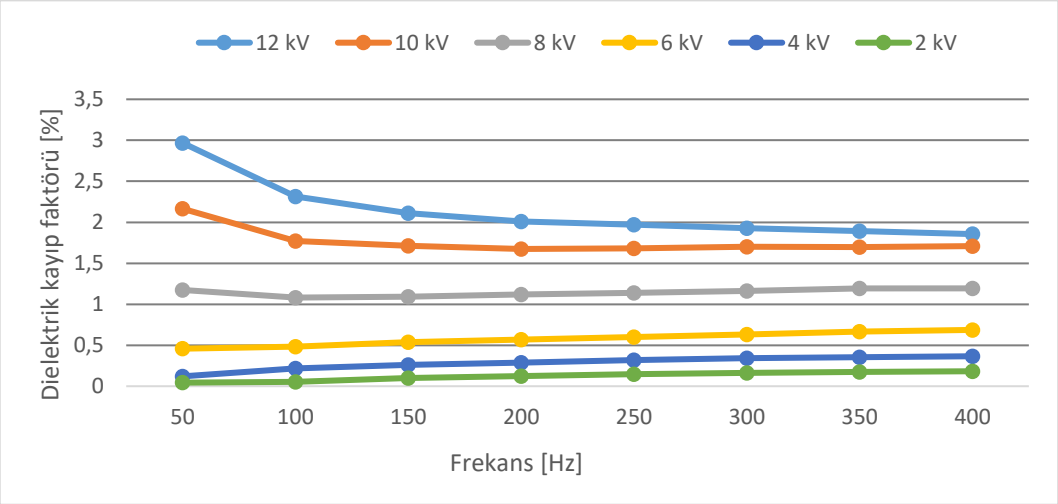


Şekil 4.15 XLPE dielektrik kayıp faktörü (Termal 4. hafta yaşlandırma sonuçları)

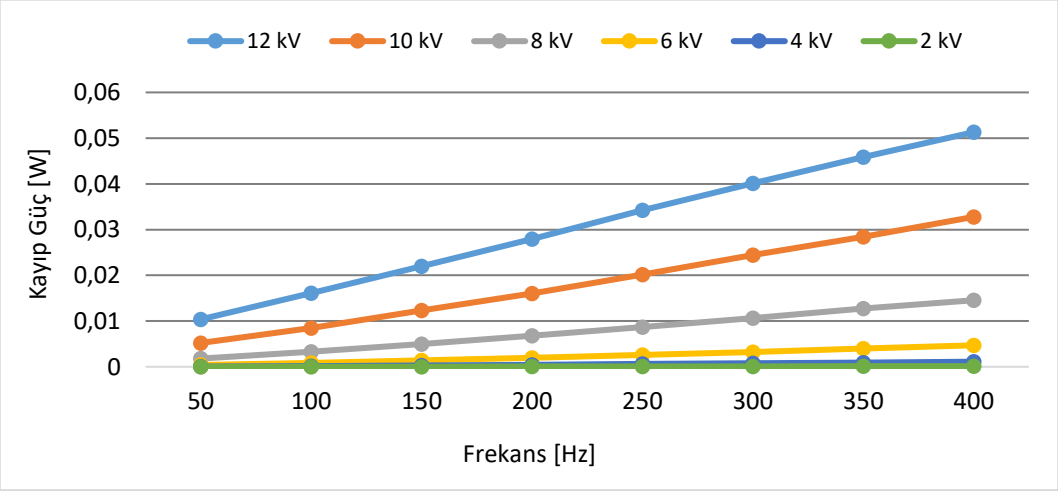


Şekil 4.16 XLPE kayıp güç (Termal 4. hafta yaşlandırma sonuçları)

4. hafta sonunda dielektrik kayıp faktöründe belirgin bir değişme olmamış ancak kayıp güçte artış gözlemlenmiştir. Geçen hafta 50 Hz seviyesindeki yüksek artış bu hafta gözlemlenmemiştir. 8 kV ve üstündeki gerilim sevilerindeki değişim %5 civarında olmuştur. En yüksek güç kaynının olduğu noktada 30 mW seviyesinden 45 mW seviyesine çıkmıştır. Nem yaşlanması 4. hafta sonuçları aşağıdaki gibi olmuştur.

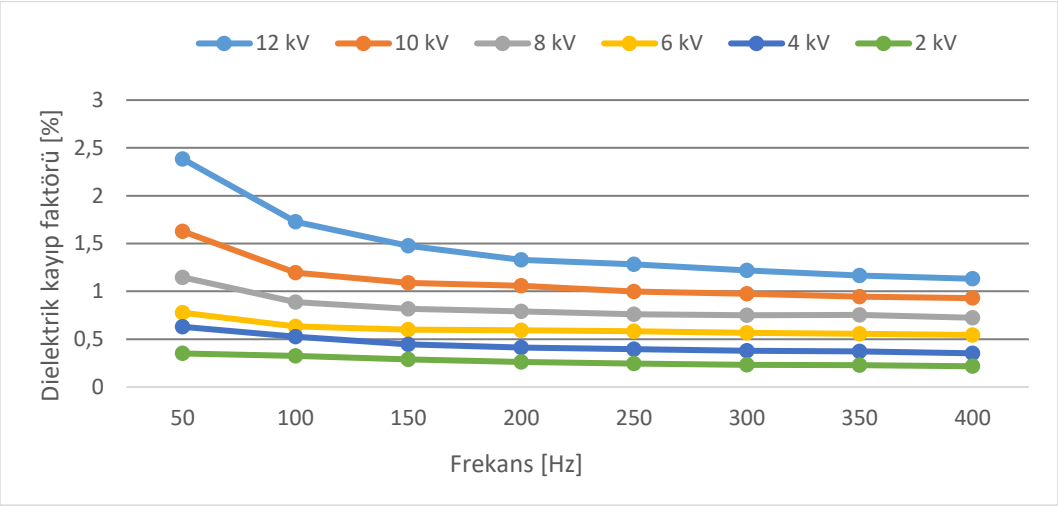


Şekil 4.17 XLPE dielektrik kayıp faktörü (Nem 4. hafta yaşlandırma sonuçları)

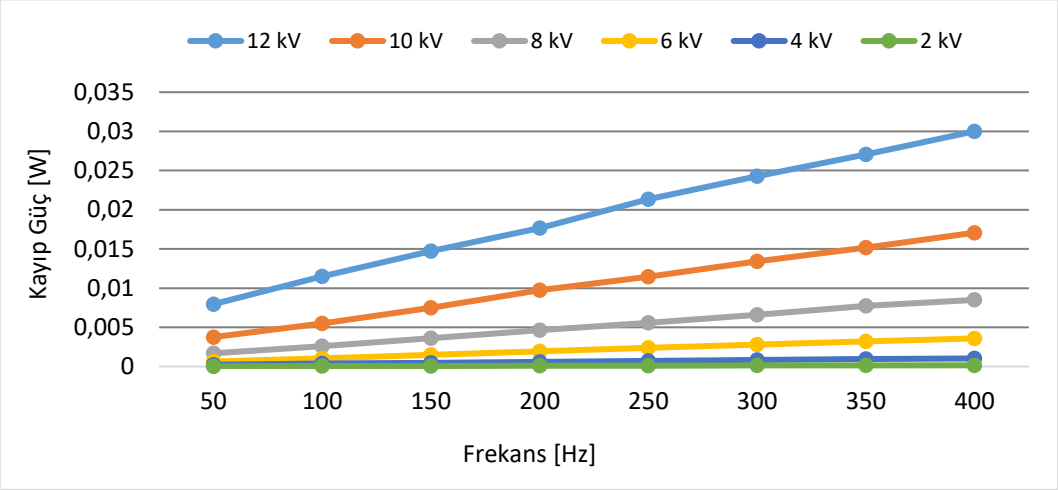


Şekil 4.18 XLPE kayıp güç (Nem 4. hafta yaşlandırma sonuçları)

Kayıp gücün en yüksek olduğu noktada yaklaşık %5 artış gözlemlenmiştir. Ancak dielektrik kayıp faktörü nispeten ciddi artışlar göstermeye devam etmektedir. %3 seviyesine gelmiş durumdadır. Nemin XLPE yapısına iyice nüfuz etmesiyle beraber dielektrik özelliklerdeki bozulmanın artmaya devam etmesi beklenmektedir. Aşağıda 5. hafta termal yaşlandırma sonuçları verilmiştir.

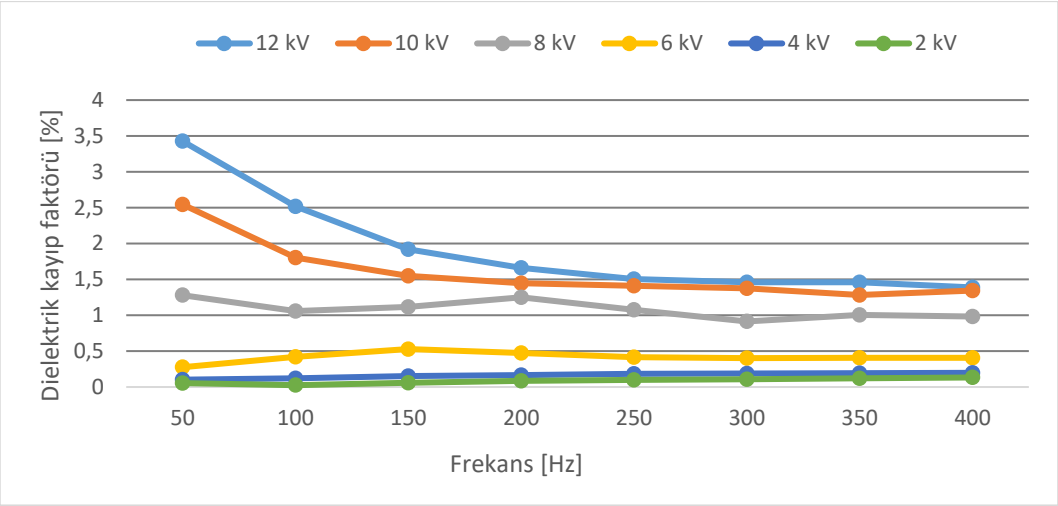


Şekil 4.19 XLPE dielektrik kayıp faktörü (Termal 5. hafta yaşlandırma sonuçları)

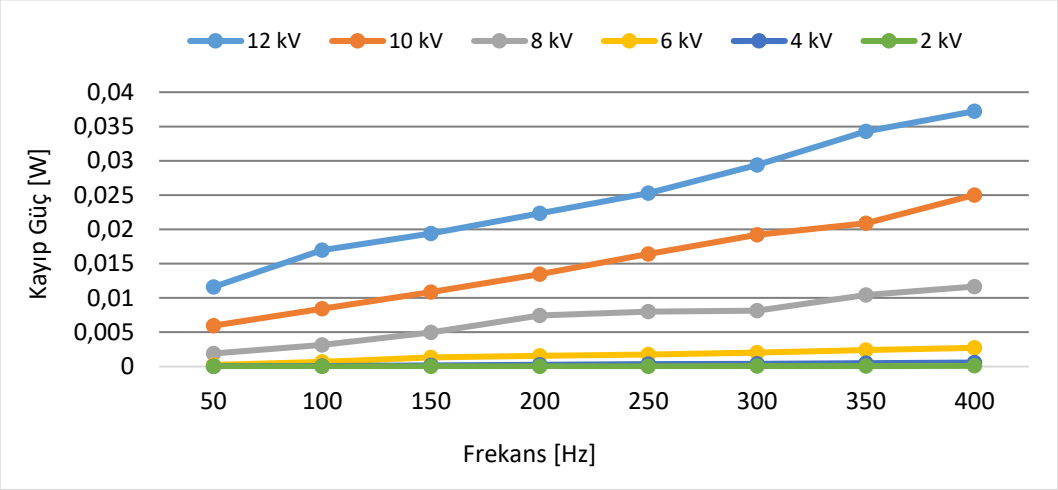


Şekil 4.20 XLPE kayıp güç (Termal 5. Hafta yaşlandırma sonuçları)

5. haftada 50 Hz 12 kV'ta ciddi bir artış gözlemlenmemiştir. Ancak 6 kV mertebesinde %20'lik bir artış gözlemlenmiştir. Aynı şekilde 50 Hz 2 kV'ta da belirgin bir değişim söz konusudur. Bu noktada artık düşük gerilim seviyelerinde de daha yüksek dielektrik kayıp faktörü değerleri gözlemlenmiştir. Kayıp güç değerinde ise yeniden düşüş gözlemlenmiştir. Bunun yine ölçüm hatası kapsamında olma ihtimali söz konusudur. Kayıp gücün en yüksek olduğu noktada 30 mW seviyesinde olduğu grafikte görülmektedir. Nem yaşlandırması 5. hafta sonuçları ile devam edilmiştir.



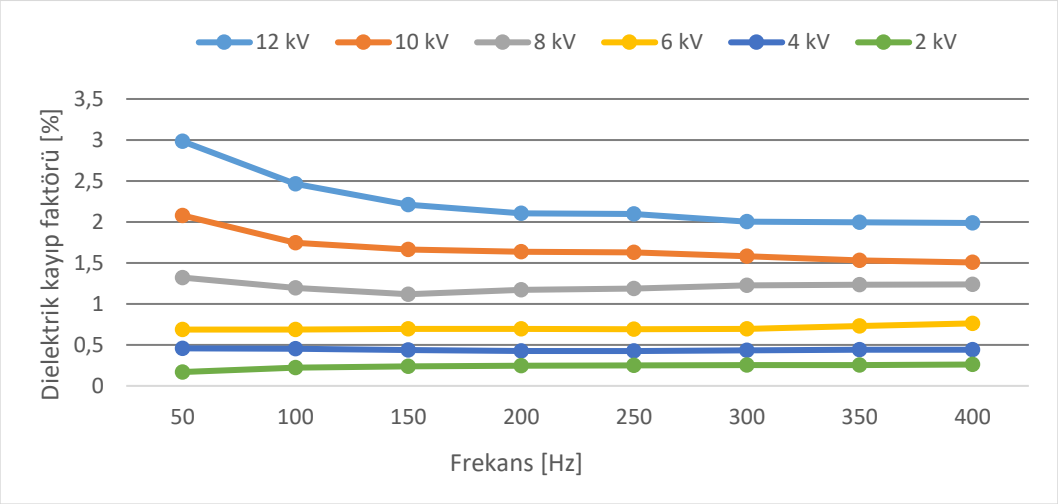
Şekil 4.21 XLPE dielektrik kayıp faktörü (Nem 5. hafta yaşlandırma sonuçları)



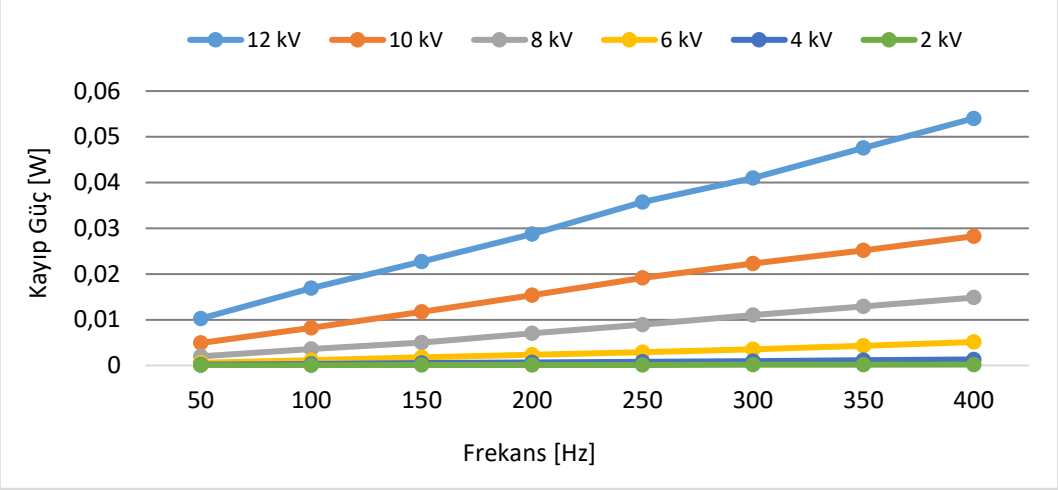
Şekil 4.22 XLPE kayıp güç (Nem 5. hafta yaşlandırma sonuçları)

Bu haftada termal yaşlandırma etkileri yavaşlamışken, nem yaşlandırma etkileri hala bariz değişiklikler meydana getirmektedir. Dielektrik kayıp faktörü 12 kV 400 Hz değerinde %3,5 seviyesine gelmiş durumdadır. Geçen haftaya göre %0,5 artmış durumdadır. Bununla beraber kayıp gücün en yüksek olduğu noktada 12 mW civarında bir düşüş gözlemlenmiştir. Şunu unutmamak gerekir ki kayıp güç yalnızca yalıtkanların dirençlerine bağlı olarak değil aynı zamanda polarizasyon kayıpları, izotermik kayıplar, sıcaklık kayıpları gibi kayıplar söz konusudur. Hatta elektrik alanın yönünün değiştiği durumlarda histerisiz kayıplar gibi kayıplar da oluşmaktadır. Ölçüm sırasıyla 2 kV'tan 12 kV'a kadar yapılmaktadır. Dolayısıyla malzeme farklı elektrik alanlara arka arkaya maruz kalmaktadır. Bunun ve yukarıda sayılan diğer faktörlerin etkisiyle kayıp güçte bu tip değerler elde edilmiş olabilir.

6. hafta sonuçlarıyla devam edilecektir.



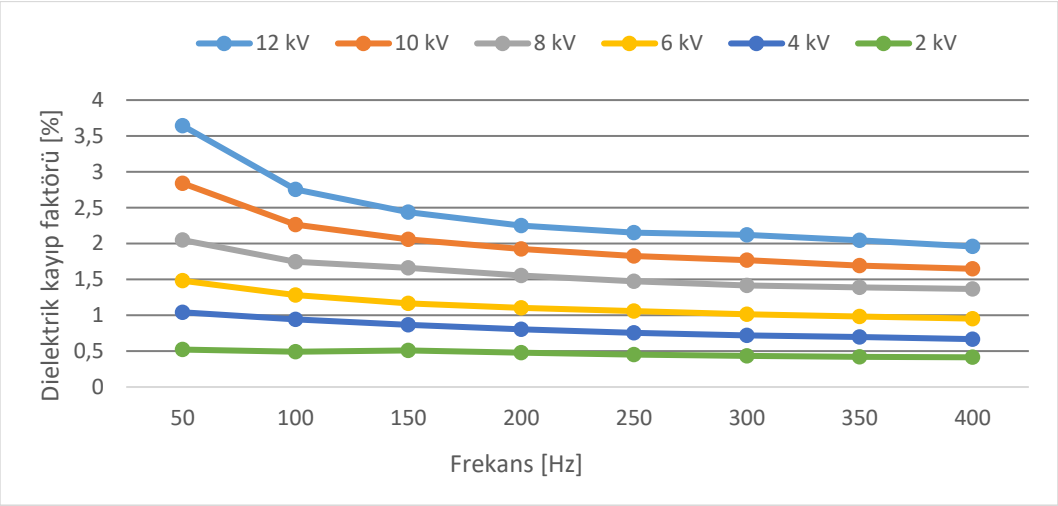
Şekil 4.23 XLPE dielektrik kayıp faktörü (Termal 6. hafta yaşlandırma sonuçları)



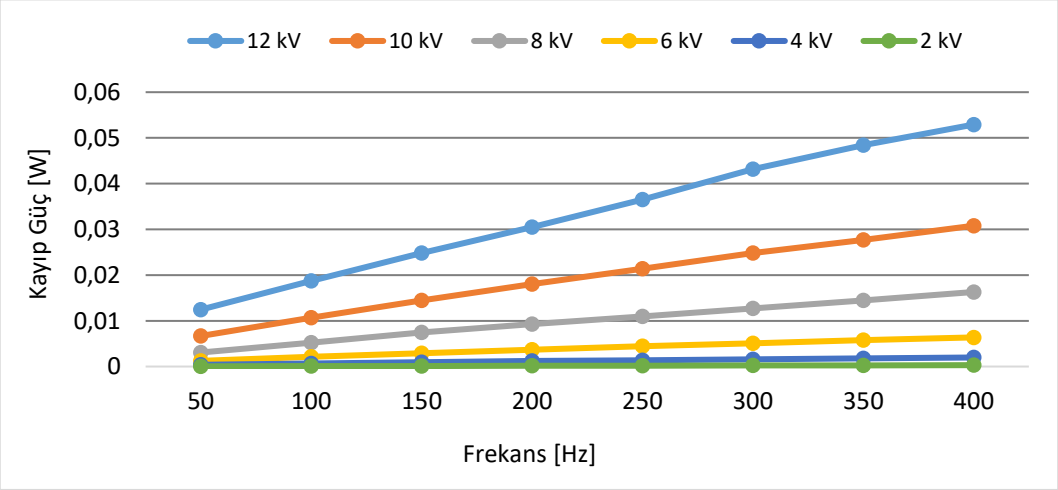
Şekil 4.24 XLPE kayıp güç (Termal 6. Hafta yaşlandırma sonuçları)

Toplam 6 haftalık yaşlandırmanın son haftasında dielektrik kayıp faktörü (tan delta) 50 Hz 12 kV seviyesinde %3 seviyesine gelmiştir. Yaşlandırma öncesi %1,1 seviyesinde olduğunu düşünürsek yaklaşık 2,6 katına çıkmıştır. Literatürde bu seviyelerdeki yaşlandırmalarla benzer değişimler gözlemlenmiştir. Bilindiği gibi silan bağlı XLPE'lerde çapraz bağlanmayı hızlandırıcı çeşitli katkı malzemeleri kullanılmaktadır. Bu da malzeme kalitesini doğrudan etkilemektedir. Buna rağmen makul sonuçlar elde edilmiştir [4]. Kayıp güç ise 55 mW seviyesine ilerlemiştir.

6. hafta nem yaşlandırması sonuçlarıyla devam edilecektir.



Şekil 4.25 XLPE dielektrik kayıp faktörü (Nem 6. hafta yaşlandırma sonuçları)



Şekil 4.26 XLPE kayıp güç (Nem 6. hafta yaşlandırma sonuçları)

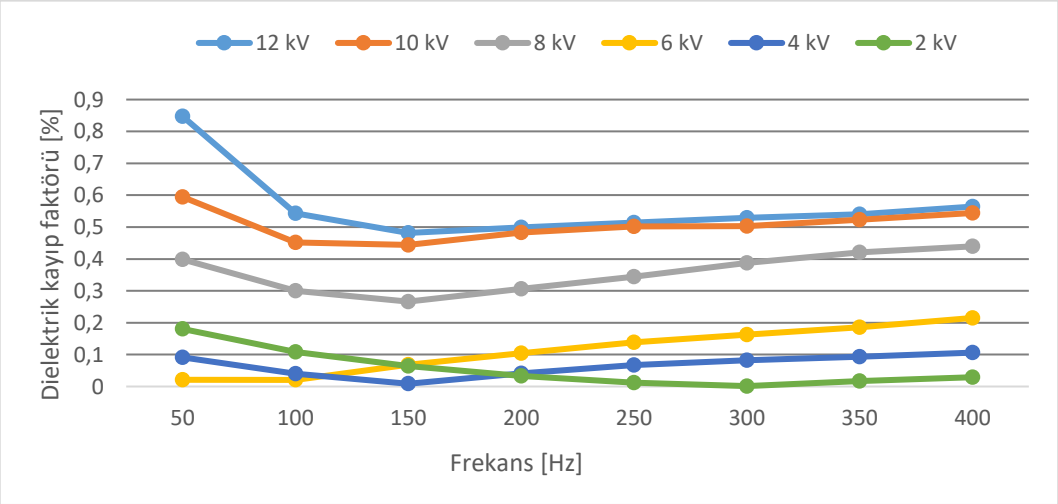
6 haftalık nem yaşlandırması sonucunda 2 kV 50 Hz değerinde %0,17 değerinden %0,50 değerine bir artış gözlemlenmiştir. 4 kV 50 Hz değerinde yine %0,15 seviyesinden %1'e çok ciddi artış gözlemlenmiştir. Bu noktada düşük gerilim seviyelerinde de dielektrik kayıp faktörü ciddi değişimler göstermiştir. En yüksek olduğu noktadaysa %1,1 seviyesinden %3,7 seviyesine bir yükselme gözlemlenmiştir. Yani 6 haftalık termal yaşlandırma etkisine göre daha büyük bir değişim gözlemlenmiştir. Bununla beraber termal yaşlandırmayla yaklaşık aynı seviyede kayıp güç gözlemlenmiştir. Kayıp güç en yüksek olduğu 12 kV 400 Hz seviyesinde 53 mW değerindedir. Özellikle dielektrik kayıp faktörü için literatüre paralel şekilde değer elde edilmiştir [34].

4.1.2 LDPE Deney Sonuçları

LDPE esnek yapısı olan, şeffaf bir polimer. İleriki bölümlerde göreceğimiz gibi çekme kopma testlerindeki uzama miktarı oldukça yüksek. Aynı zamanda kimyasal dayanımı da iyi olan LDPE'nin dezavantajı düşük erime sıcaklığının olmasıdır diyebiliriz. Aşırı gerilim durumlarında yapısının bozulmaya yatkın olması onu orta gerilim seviyesi için kullanılabilir bir yalıtkan olmaktan çıkarıyor. Düşük sıcaklıklarda çok iyi bir yalıtkanken sıcaklık 100 °C'yi geçtiğinde plazma formuna geçiş başlar ve direnci düşer, dielektrik sabiti yükselir ya dielektrik kayıp faktörü yükselir.

Tez içerisindeki deneyler numuneler fırından çıkarılıp bir süre bekledikten sonra yapılıyor, yani termoplastik malzemeler bu sırada soğuyup eski katı formuna geliyor. Bu yüzden her ne kadar LDPE, HFFR gibi malzemelerin bazı özelliklerinde ciddi gerilemeler göremesek bile, yüksek sıcaklarda ölçüm yapabilseydik daha ciddi gerilemeler görebilirdik.

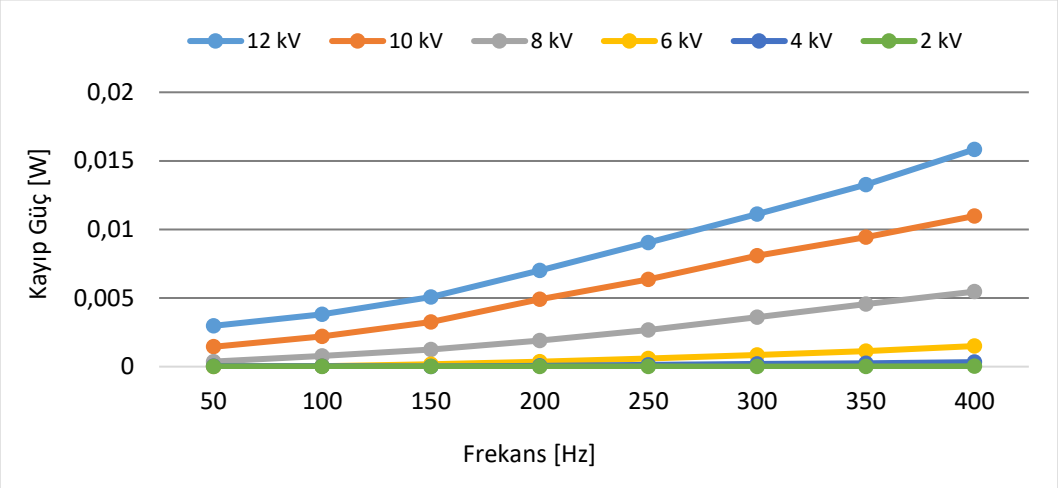
Bu bölümde LDPE'nin dielektrik kayıp faktörü ve kayıp güçlerinin haftalara göre değişimi verilecektir. Öncelikle yaşlanmamış hali aşağıdaki gibidir.



Şekil 4.27 LDPE yaşlandırma öncesi dielektrik kayıp faktörü

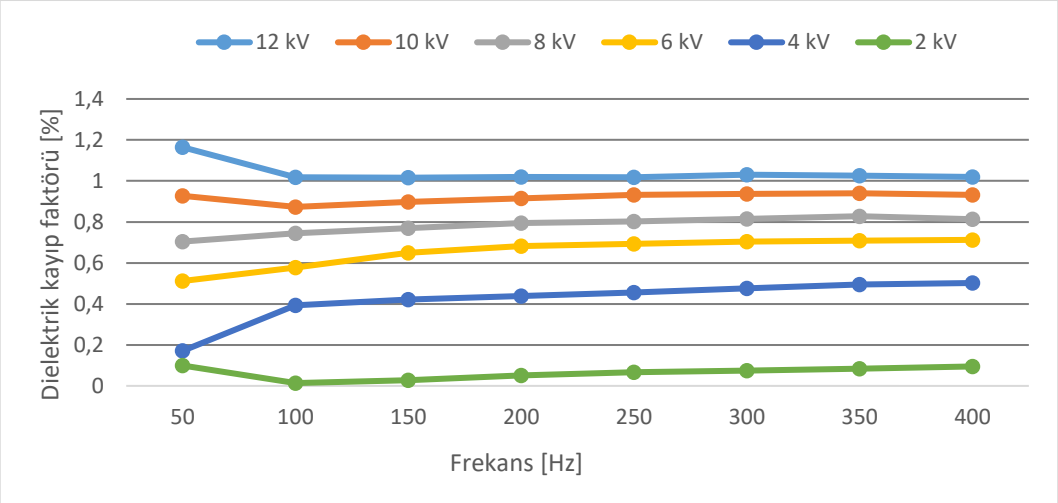
Dielektrik kayıp faktörü değerleri beklendiği gibi çıkmıştır. Başlangıç dielektrik kayıp faktörü değerlerinin XLPE'den daha iyi olduğu görülmüştür. 12 kV 400 Hz'de %0,85 seviyesinde dielektrik kayıp faktörü gözlemlenmiştir. Grafikteki çakışan değerler ölçümlerde gelen negatif değerlerin mutlak değerinin alınması

sonucu oluşmuştur. Yaşlandırma devam ettikçe negatif değerler tamamen kaybolmaktadır.

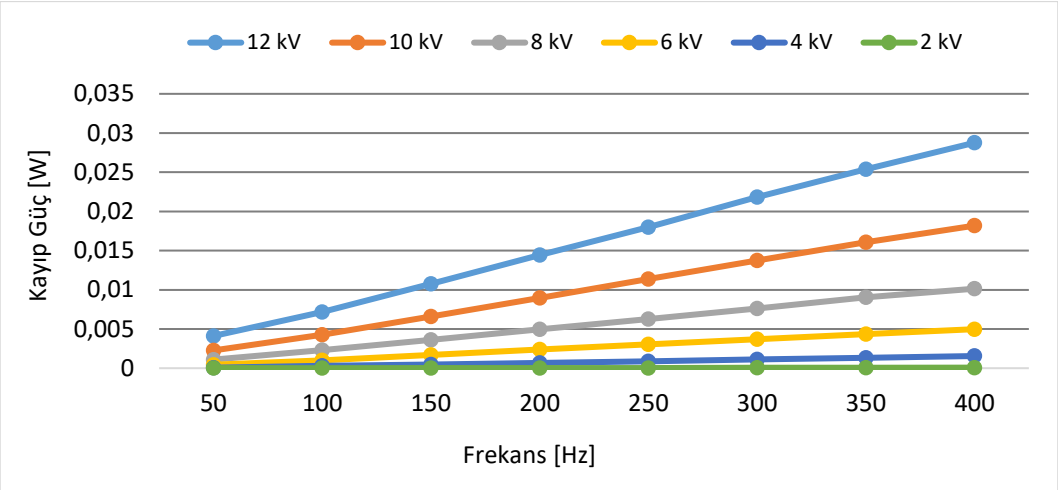


Şekil 4.28 LDPE yaşlandırma öncesi kayıp güç

Görüldüğü gibi yaşlandırılmamış LDPE'nin kayıp güç değerleri yaklaşık olarak XLPE ile aynıdır. Günümüzde XLPE üretimi için en çok kullanılan malzemelerden biri de LDPE'dir. XLPE de LDPE'nin serbest radikaller vasıtasıyla çapraz bağlanması sonucu oluşmaktadır. Şimdi LDPE'nin yaşlandırma sonrası grafiklerine geçebiliriz.

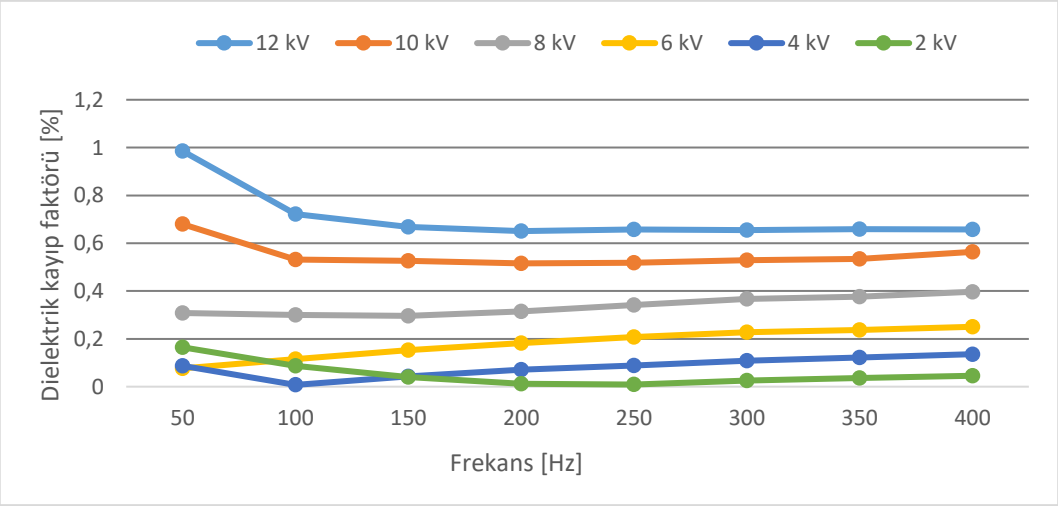


Şekil 4.29 LDPE dielektrik kayıp faktörü (Termal 1. hafta yaşlandırma sonuçları)



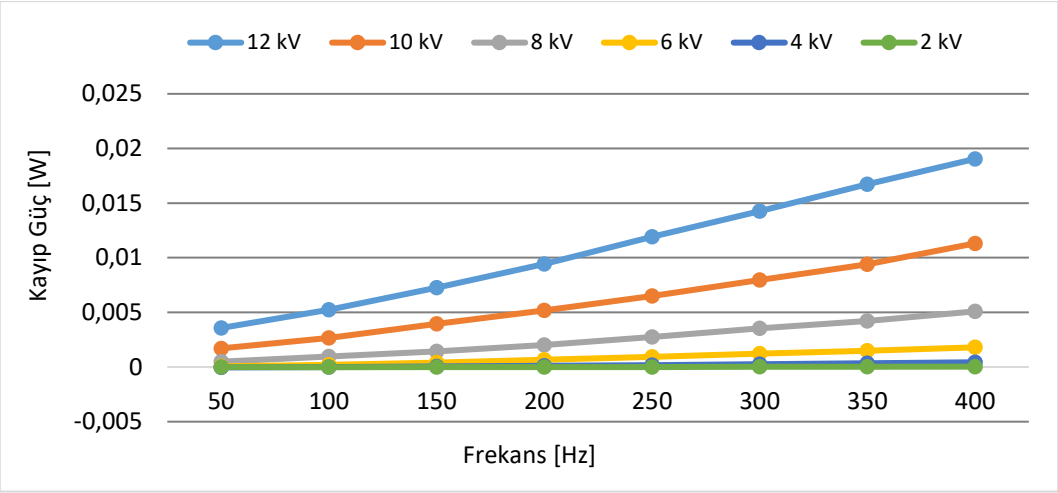
Şekil 4.30 LDPE kayıp güç (Termal 1. hafta yaşlandırma sonuçları)

LDPE için kayıp güç 17 mW civarındayken 28 mW'ın üstüne çıkmıştır. Dielektrik kayıp faktörüyse %1,18 seviyesine çıkmıştır. 1. hafta nem etkisini gözlemlemek için aşağıdaki tablolar oluşturulmuştur.



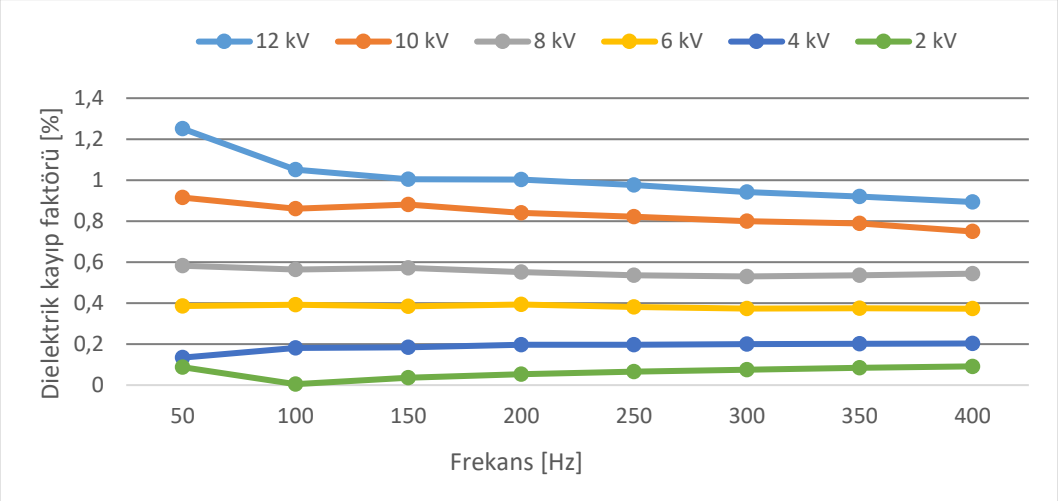
Şekil 4.31 LDPE dielektrik kayıp faktörü (Nem 1. hafta yaşlandırma sonuçları)

Grafikte görüldüğü üzere dielektrik kayıp faktöründe ciddi bir değişim görülmemiştir. 1. hafta sonunda dielektrik kayıp faktörü en yüksek olduğu noktada yani 50 Hz 12 kV'ta %1 seviyesindedir. 2-4-6 kV civarındaki çakışmalar negatif değerlerin mutlak değerlerinin alınması sonucu ortaya çıkmıştır.



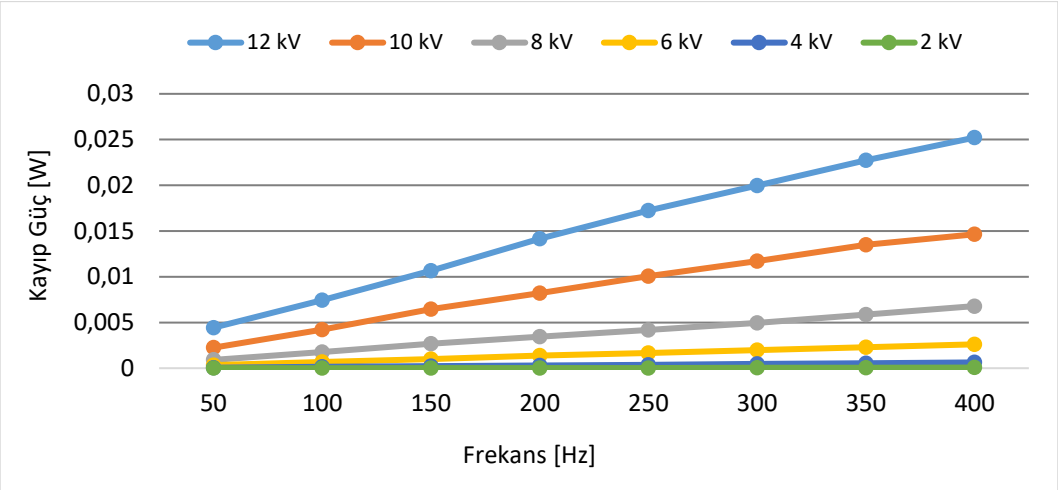
Şekil 4.32 LDPE kayıp güç (Nem 1. hafta yaşlandırma sonuçları)

Kayıp güçte de aynı şekilde ciddi bir değişim gözlemlenmemiştir. Termoplastikler yapısı gereği sıcak bir ortamda bekletilse bile soğuduktan sonra eski halini almakta ve bu tip koşullar termoplastikler üzerinde tersinmez bir bozunmaya kısmen yol açmamaktadır. Böylelikle termal etkinin XLPE'ye göre daha kısıtlı etki etmesi beklenmektedir. 2. hafta sıcaklık sonuçlarıyla devam edelim.



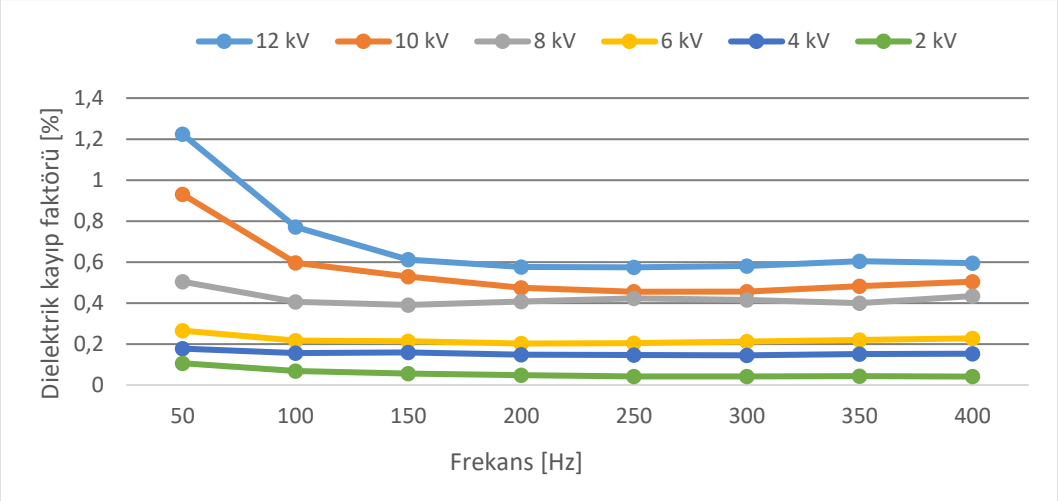
Şekil 4.33 LDPE dielektrik kayıp faktörü (Termal 2. hafta yaşlandırma sonuçları)

Burada görüldüğü gibi dielektrik kayıp faktörü değerleri geçen haftaya göre yaklaşık olarak aynı kalmıştır. Unutmamak lazım ki tan delta değerine etki eden birden fazla faktör bulunmaktadır. Kristalizasyon, moleküler ağırlık değişimi ve oksitlenmeye bağlı olarak LDPE'de bu değer değişiklik göstermektedir. Sıcaklığa bağlı oluşan serbest radikaller polietilen zincirlerini kırmakta, bazen de bu zincirler başka zincirlerle birleşerek daha uzun zincirler oluşturabilmektedir.



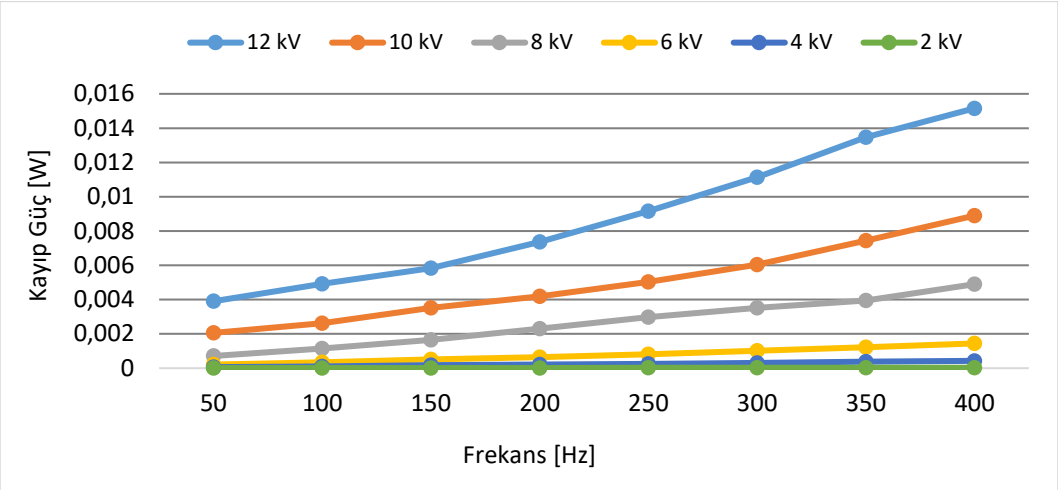
Şekil 4.34 LDPE kayıp güç (Termal 2. hafta yaşlandırma sonuçları)

Dielektrik kayıp faktörü gibi kayıp güçte de ciddi bir değişim söz konusu olmamıştır. Hatta en yüksek değişimin olduğu noktada 2-3 mW'lık bir düşüş söz konusudur. 2. hafta nem sonuçları aşağıdaki gibi olmuştur.



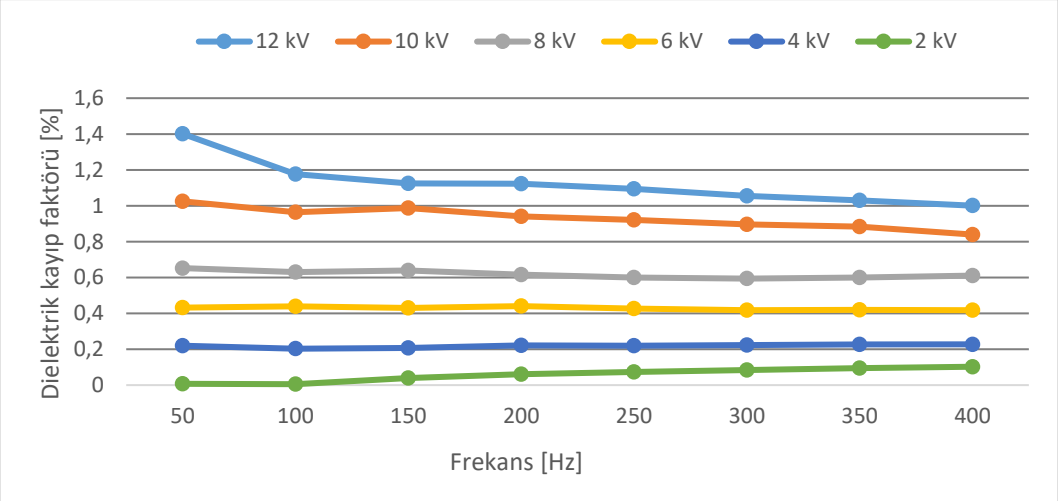
Şekil 4.35 LDPE dielektrik kayıp faktörü (Nem 2. Hafta yaşlandırma sonuçları)

Su ve nemin LDPE içerisine nüfuz etmesi sonucu malzeme yapısında serbest yük taşıyıcıları giderek artmakta ve dielektrik kayıplar yükselmektedir. Su molekülleri özellikle yüksek frekansta ve elektrik alan altında serbestçe hareket edebilmektedir. Bu noktada LDPE yapısına suyun daha ciddi nüfuz edebildiğini söyleyebiliriz. Örneğin 6 kV 50 Hz seviyesinde gözlem yapacak olursak, %0,1 seviyesindeki dielektrik kayıp faktörünün yaklaşık 3 katına çıkarak %0,3 seviyesine yaklaştığını görebiliriz. H_2O nüfuzunun arttığı durumda düşük özellikle düşük gerilim seviyelerinde ciddi artışlar gözlemlenmektedir.



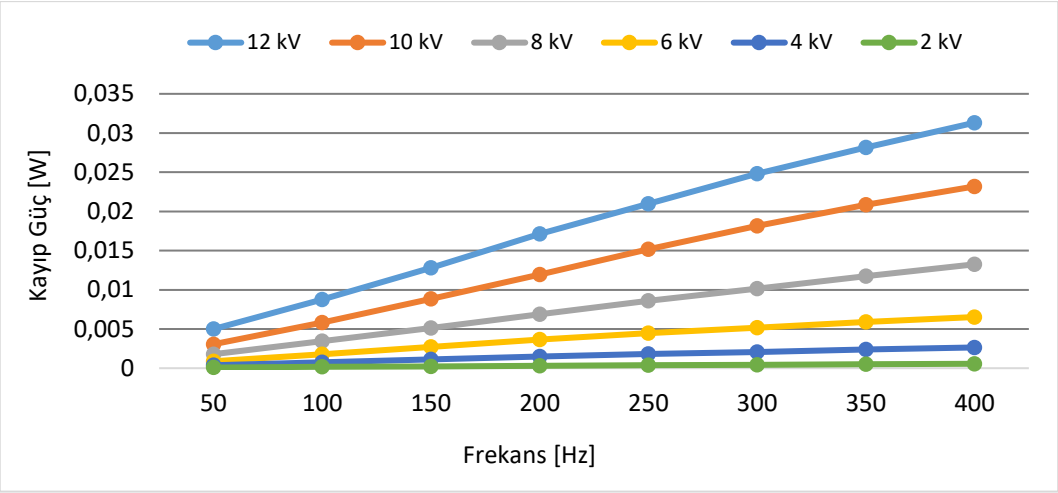
Şekil 4.36 LDPE kayıp güç (Nem 2. hafta yaşlandırma sonuçları)

Grafikte görüldüğü üzere kayıp güç noktasında ciddi bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Hatta 1-2 mW civarında düşüş gözlemlenmiştir. Bu değerlerin çok küçük değerler olduğunu düşündüğümüzde bu derece hata payları olabilir. Yaşlandırma devam ettikçe daha belirgin farklar oluşacaktır. 3. hafta sonuçlarıyla devam edelim.



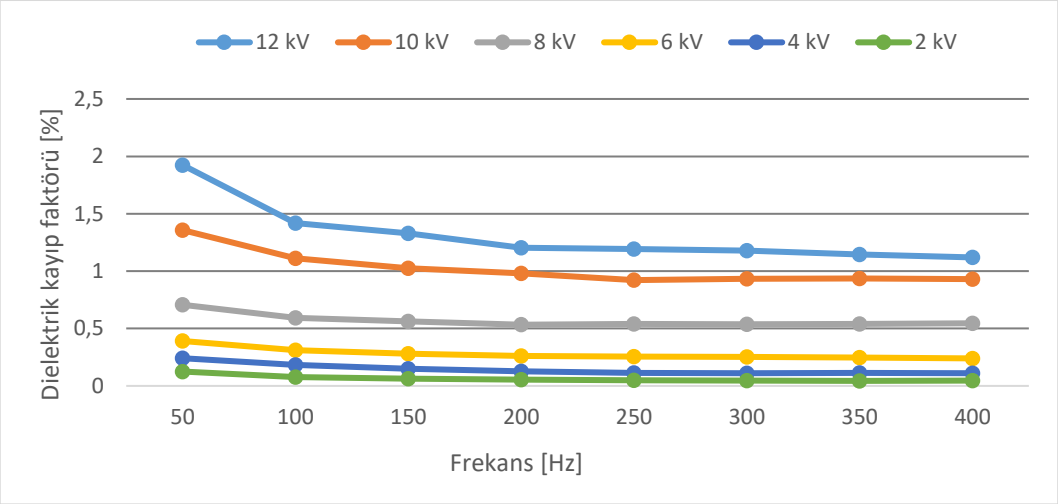
Şekil 4.37 LDPE dielektrik kayıp faktörü (Termal 3. hafta yaşlandırma sonuçları)

Sıcaklığın etkisiyle bozunmaya devam eden LDPE dielektrik kayıp faktörü en yüksek olduğu noktada %1,25 seviyesinden %1,4 seviyesine yükselmiştir. Kayıp güç değişimi aşağıdaki tablodaki gibi olmuştur.



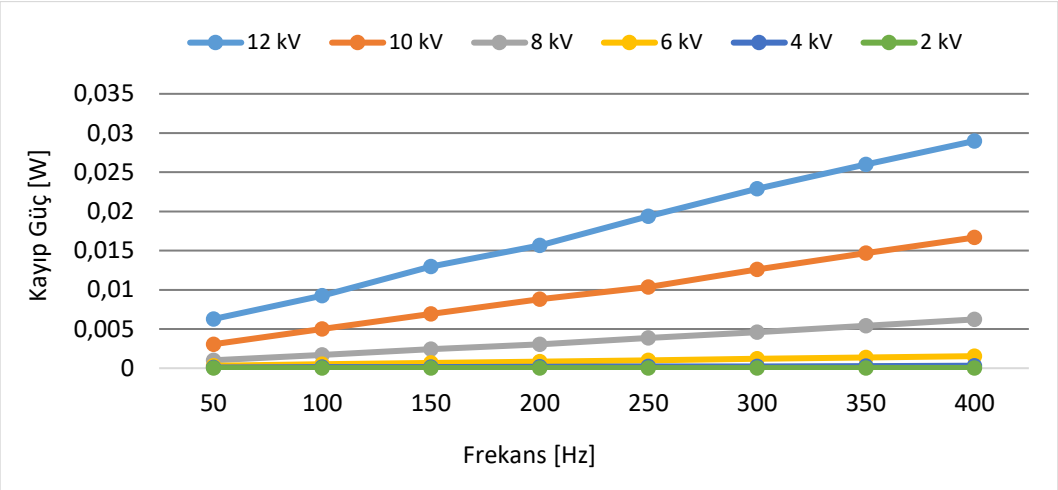
Şekil 4.38 LDPE kayıp güç (Termal 3. hafta yaşlandırma sonuçları)

Sıcaklığın etkisi kayıp güçte de bariz şekilde görülmektedir. Geçen hafta 25 mW seviyesinde ölçülen kayıp güç bu hafta 32 mW seviyesine ulaşmıştır. Yaşlanma devam ettikçe bu kayıpta da çok daha bariz artışlar olmasını bekliyoruz. Nem yaşlanması 3. hafta sonuçları aşağıda verilmiştir.



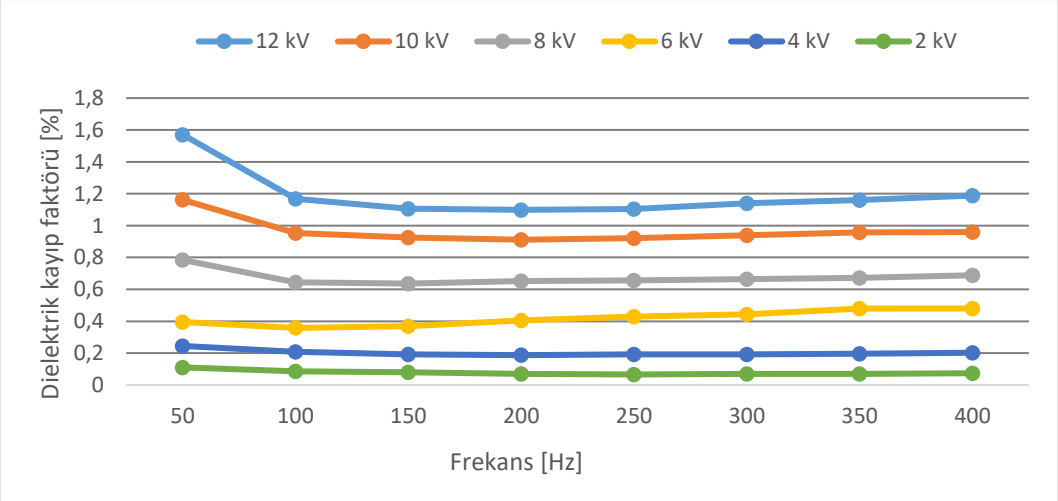
Şekil 4.39 LDPE dielektrik kayıp faktörü (Nem 3. Hafta yaşlandırma sonuçları)

3. hafta nem yaşlandırması sonuçlarına bakıldığında dielektrik kayıp faktörü değerlerinde ciddi bir artış görülmüştür. Tan delta değeri 50 Hz 12 kV'da %1,25 seviyesinden yaklaşık %2 seviyesine yükselmiştir. 50 Hz 10 kV'da %0,9 seviyesinden %1,35 seviyesine yükselme söz konusudur. Kayıp güç değişimi aşağıda verilmiştir.



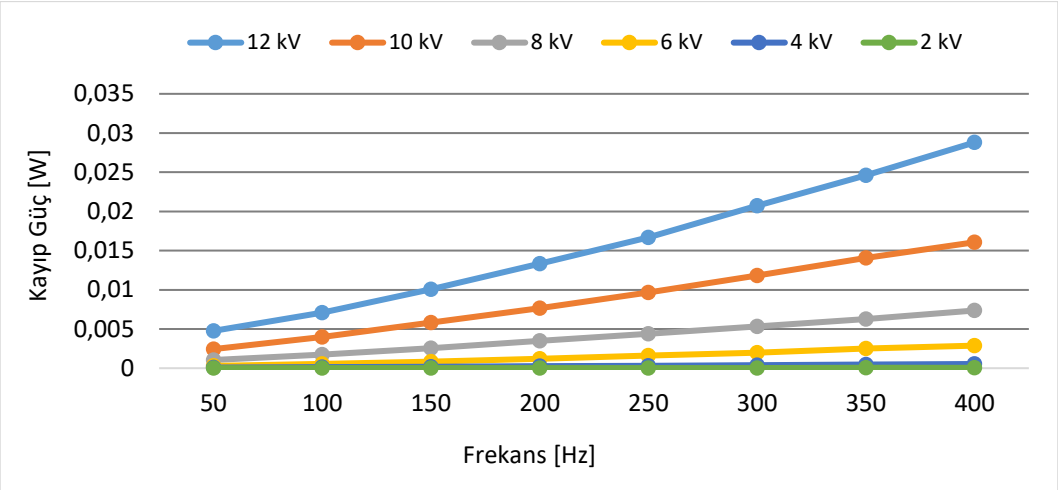
Şekil 4.40 LDPE kayıp güç (Nem 3. Hafta yaşlandırma sonuçları)

Kayıp güç nem yaşlandırmasının 3. haftasında 14-15 mW seviyesinden 30 mW seviyesine gelmiştir. Ciddi bir kayıp güç artışı yaşanmıştır. 3. Hafta termal yaşlandırma sonuçlarıyla devam edilmiştir.



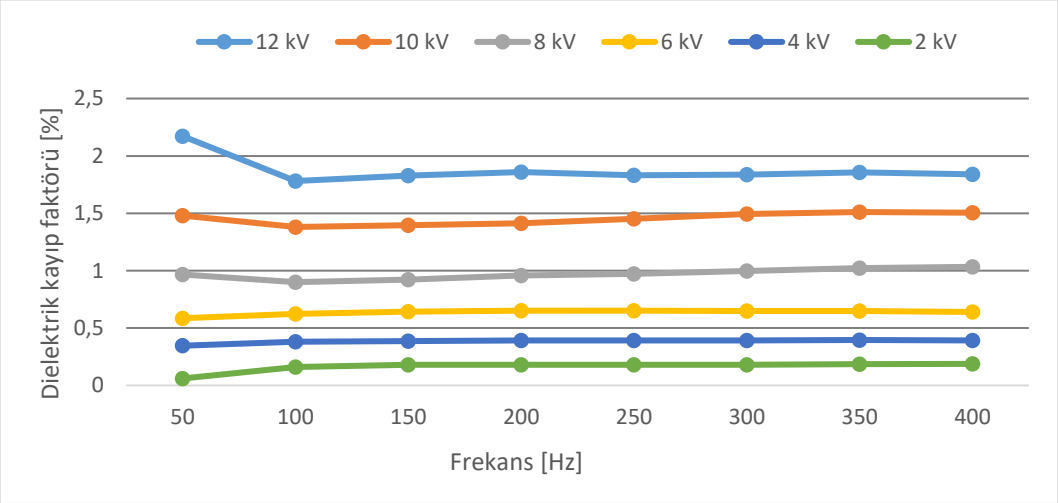
Şekil 4.41 LDPE dielektrik kayıp faktörü (Termal 4. hafta yaşlandırma sonuçları)

Dielektrik kayıp faktörü 50 Hz 12 kV mertebesinde ciddi bir artış göstermemiştir. %1,4'den %1,6 seviyesine yükselmiştir. Diğer gerilim sevileri için de benzer bir durum söz konusudur.



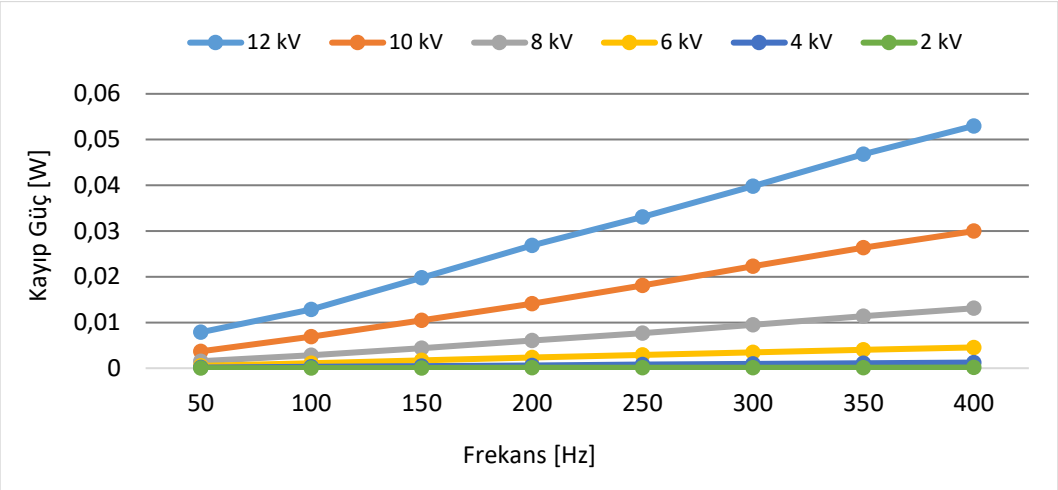
Şekil 4.42 LDPE kayıp güç (Termal 4. hafta yaşlandırma sonuçları)

Kayıp güç için de aynı durum söz konusudur. Bariz bir değişim gözlemlenmemiştir. 4.hafta nem yaşlandırması sonuçları aşağıda paylaşılmıştır.



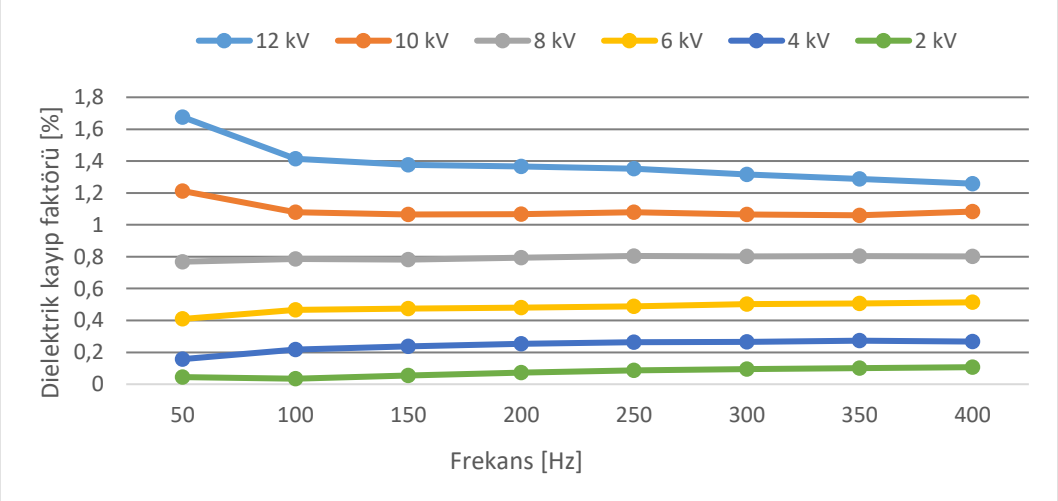
Şekil 4.43 LDPE dielektrik kayıp faktörü (Nem 4. Hafta yaşlandırma sonuçları)

Önceki hafta 50 Hz 12 kV'da yaklaşık %2 seviyesinde gelen dielektrik kayıp faktörü bu hafta %10 civarında bir artış göstermiştir. Termal yaşlandırmayla beraber çok düşük artışlar gösteren LDPE nem yaşlandırmasında daha yüksek dielektrik kayıp faktörü değerlerine çıkmaktadır. Nemin LDPE üzerinde ciddi etkisinin olduğunu söylemek yanlış olmayacaktır.



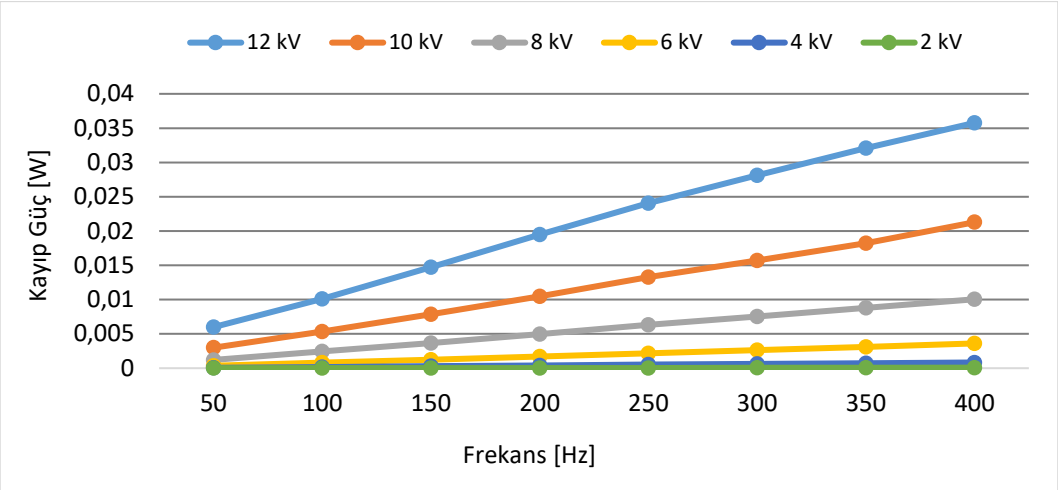
Şekil 4.44 LDPE kayıp güç (Nem 4. Hafta yaşlandırma sonuçları)

Özellikle 400 Hz 12 kV'da kayıp güç 30 mW seviyesinden 52 mW seviyesine ciddi bir artış göstermiştir. Suyun LDPE'nin iletkenliğine ciddi bir etkisi olduğu görülmüştür. Bu kayıp güç artışı ayrıca bölüm 4.4'de tartışılacaktır. Termal yaşlandırmanın 5.hafta sonuçlarıyla devam edilecektir.



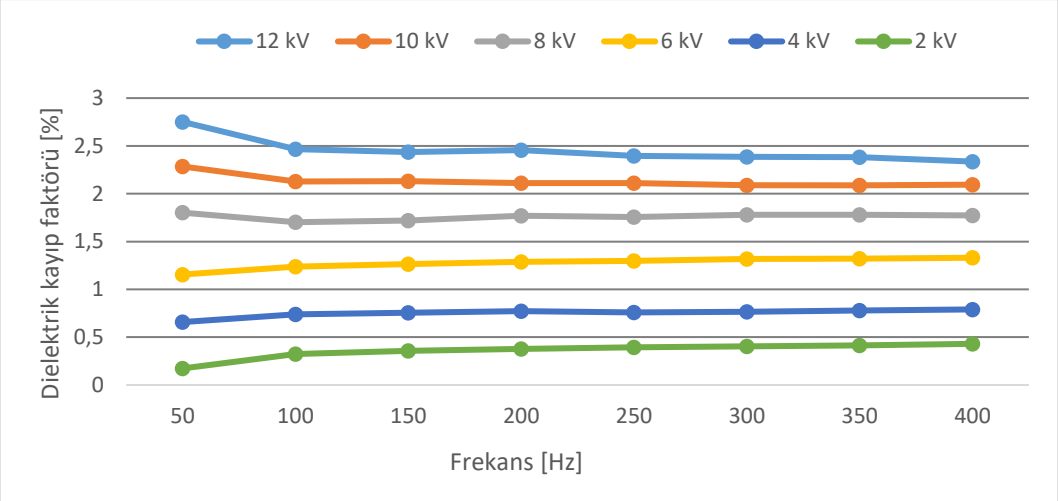
Şekil 4.45 LDPE dielektrik kayıp faktörü (Termal 5. hafta yaşlandırma sonuçları)

5.haftada da ciddi bir artış görülmemiştir. 50 Hz 12 kV'da %1,6 seviyesinden %1,7 seviyesine gelinmiştir. Her ne kadar sıcaklık serbest radikal oluşumunu ve oksidasyonu tetiklese de bu durum LDPE'yi nem kadar çok etkilememiştir.



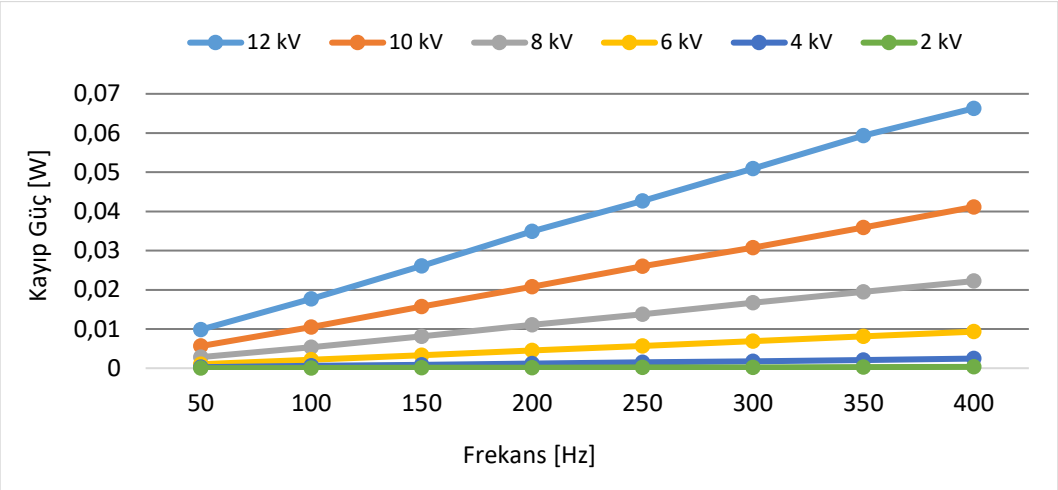
Şekil 4.46 LDPE kayıp güç (Termal 5. hafta yaşlandırma sonuçları)

Kayıp güç de aynı şekilde çok fazla değişmemiş. En yüksek olduğu noktada 30 mW seviyesinden 35 mW seviyesine ilerlemiştir. 5.hafta nem yaşlandırması sonuçları aşağıda verilmiştir.



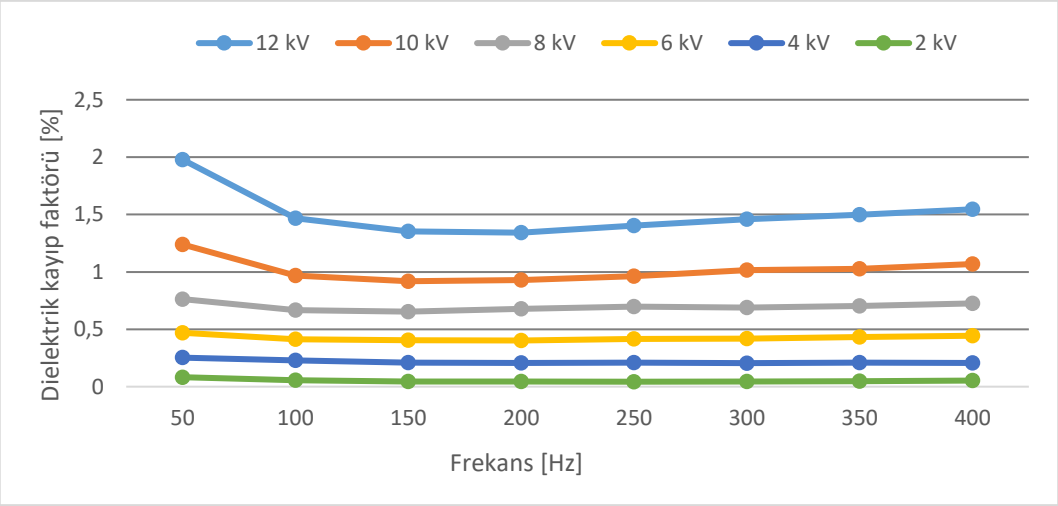
Şekil 4.47 LDPE dielektrik kayıp faktörü (Nem 5. Hafta yaşlandırma sonuçları)

5.haftada da dielektrik kayıp faktörü ciddi artış göstermiş ve %2,25 seviyesinden %2,75 seviyesine ilerlemiştir. Aynı zamanda artık düşük gerilim sevilerinde de ciddi artışlar gözlemlenmektedir. Örneğin 4 kV 50 Hz değerinde %0,35 seviyesinde olan dielektrik kayıp faktörü neredeyse 2 katına çıkmış, %0,7 civarında değere ulaşmıştır.



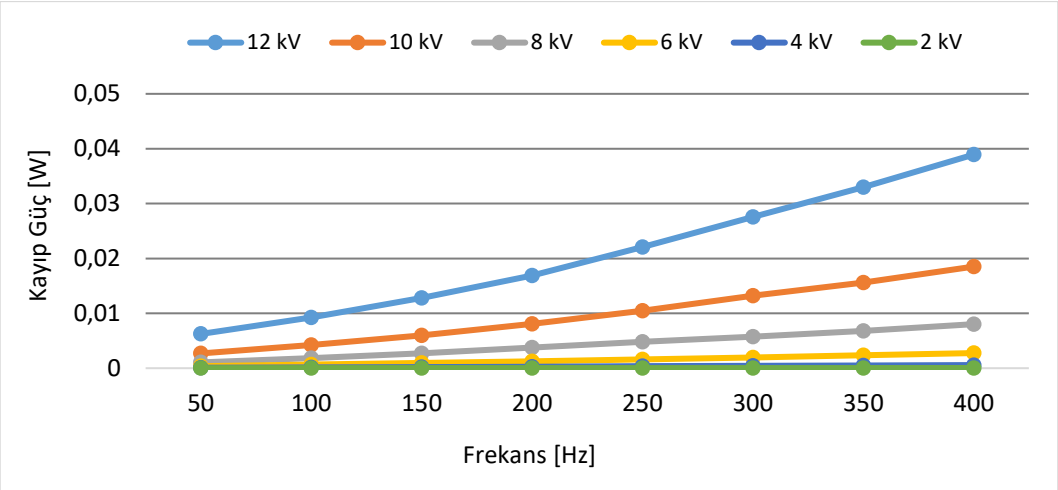
Şekil 4.48 LDPE kayıp güç (Nem 5. Hafta yaşlandırma sonuçları)

Kayıp güçte de yine belirgin bir artış gözlemlenmiş, 52 mW seviyesinden 67 mW seviyesine yükselmiştir. Suyun LDPE içerisine nüfuzu devam etmektedir. 6.hafta termal yaşlandırma sonuçlarıyla devam edilecektir.



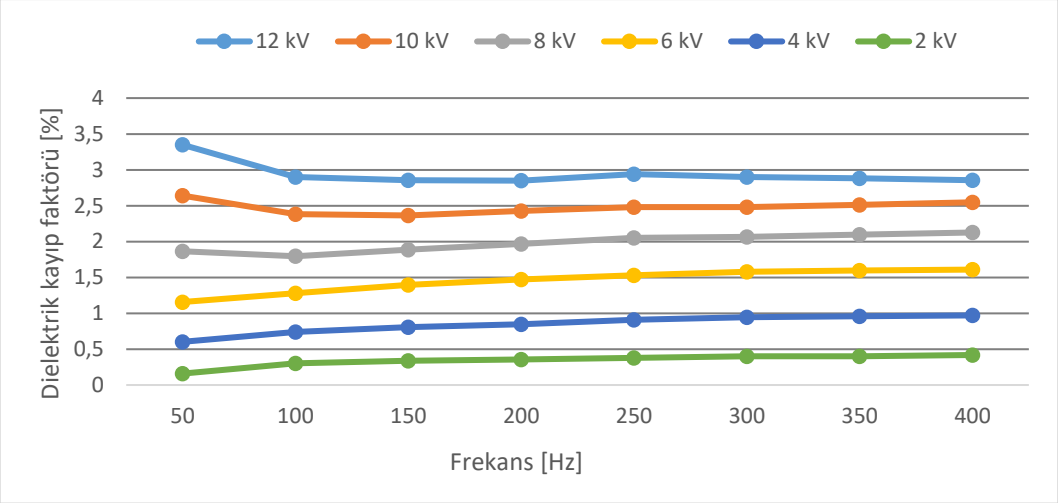
Şekil 4.49 LDPE dielektrik kayıp faktörü (Termal 6. hafta yaşlandırma sonuçları)

Bu haftada geçen haftaya göre bariz değişimler olmuştur. Dielektrik kayıp faktörü 50 Hz 12 kV'da %1,7 seviyesinden %2 seviyesine yükselmiştir. 4 kV 50 Hz'de %0,17 seviyesinde olan dielektrik kayıp faktörü %0,25 seviyesine yükselmiştir. Yaşlanmanın ilerleyen haftalarında yüksek gerilim ve frekanslardaki değişim yüzdesel olarak düşük kalmasına rağmen, düşük gerilim ve frekanslarda yüzdesel olarak daha büyük değişimler yaşanmaktadır. XLPE'ye kıyasla sıcaklık performansının iyi gözükmesinin nedenleri bölüm 4.4'de tartışılacaktır.



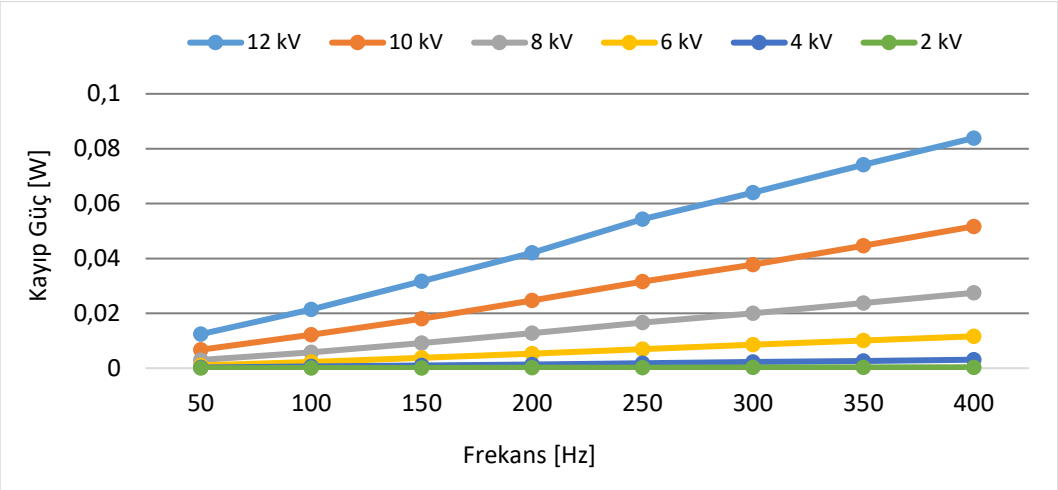
Şekil 4.50 LDPE kayıp güç (Termal 6. hafta yaşlandırma sonuçları)

Kayıp güçte çok bariz değişimler olmamış ancak 12 kV 400 Hz seviyesinde 35 mW değerinden 39 mW değerine bir yükselme gözlemlenmiştir. 6.hafta nem yaşlandırma sonuçlarıyla devam edilecektir.



Şekil 4.51 LDPE dielektrik kayıp faktörü (Nem 6. Hafta yaşlandırma sonuçları)

6.haftada nemle yaşlandırmada bozunma hızı artmış ve dielektrik kayıp faktörü %2,75 seviyesinden %3,35 seviyesine yükselmiştir. Yaklaşık olarak XLPE ile aynı performansı göstermiş olup neme karşı dayanım konusunda XLPE ile yarışabilir düzeyde değerler elde edilmiştir.

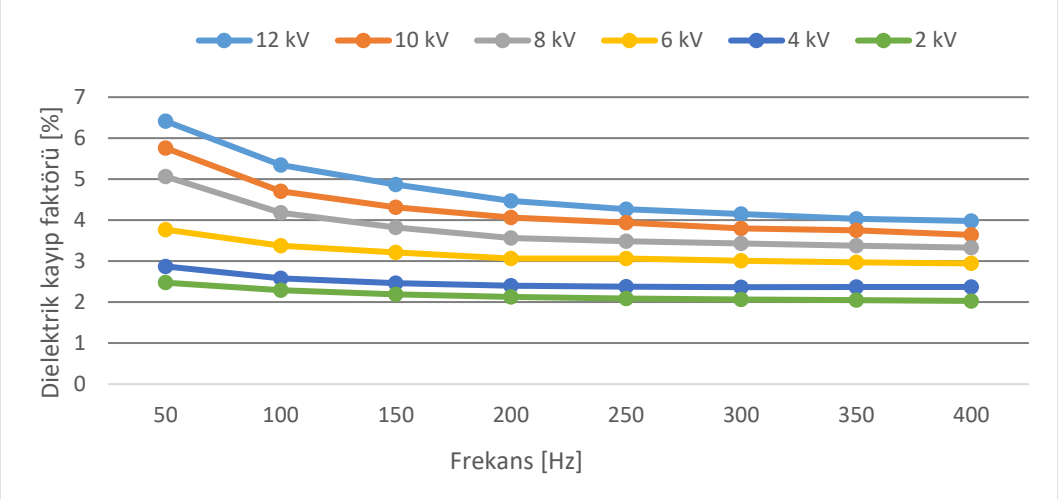


Şekil 4.52 LDPE kayıp güç (Nem 6. Hafta yaşlandırma sonuçları)

Kayıp güç noktasında LDPE'nin 400 Hz 12 kV'da XLPE'ye göre çok daha yüksek kayıp güç miktarının olduğunu söylemek doğru olacaktır. XLPE'de 50-55 mW mertebesinde bir kayıp güç olmasına rağmen, LDPE'de 85 mW seviyesinde kayıp güce ulaşılmıştır.

4.1.3 HFFR Termoplastik Deney Sonuçları

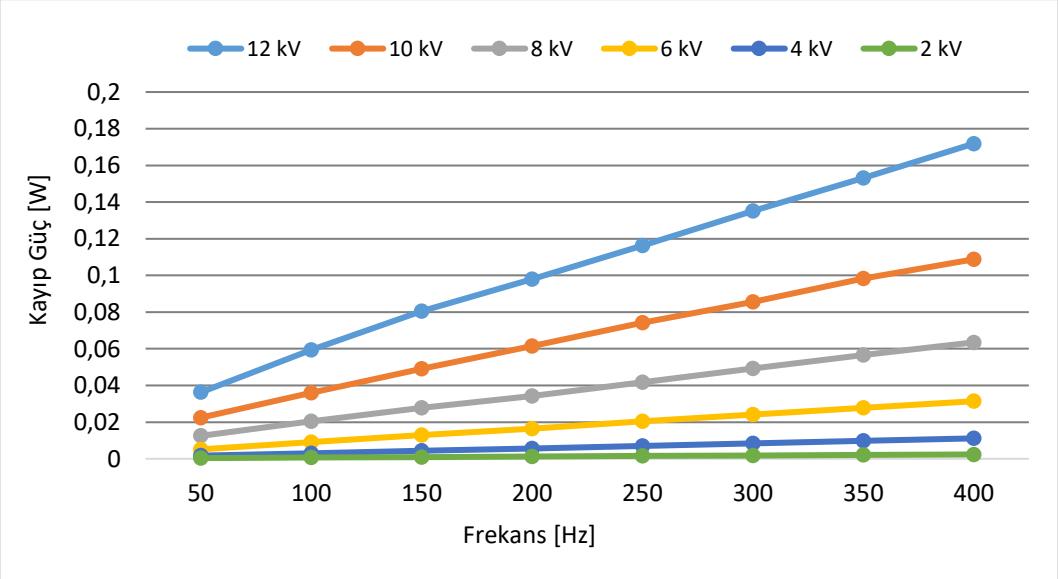
HFFR yalıtkanın yapısı ve üretim süreçleriyle ilgili bilgiler önceki bölümlerde verilmişti. Bu bölümde HFFR'nin neme ve sıcaklığa karşı haftalar içinde değişen dielektrik performansını inceleyeceğiz. Doğal olarak sıcaklığa karşı performansının iyi olmasını beklerken neme karşı gösterdiği performansta yaşlanmayla beraber ölçülen gerileme grafiklerde gösterilmiştir. Öncelikle yaşlandırılmamış numune ölçümleriyle başlanmıştır.



Şekil 4.53 HFFR yaşlandırma öncesi dielektrik kayıp faktörü

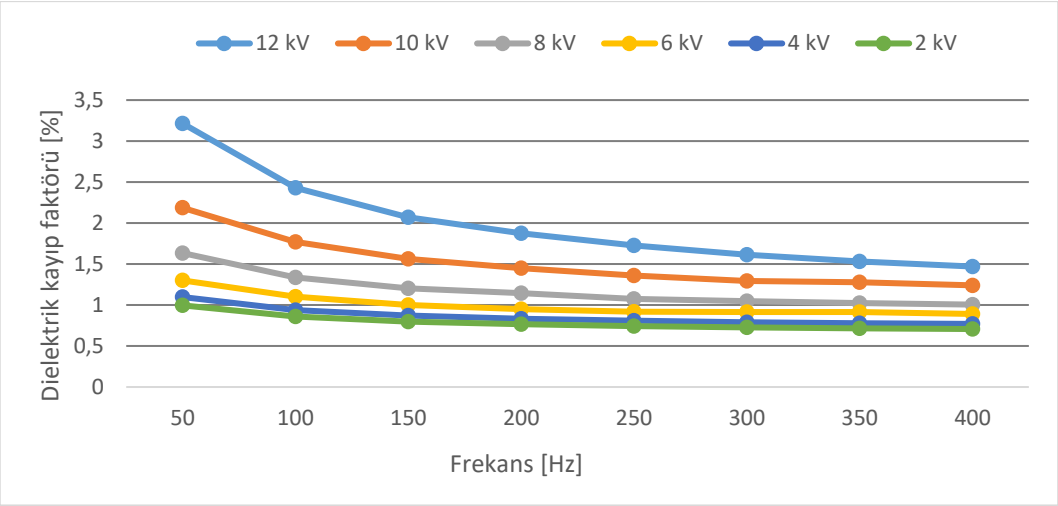
HFFR malzemenin dielektrik kayıp faktörü başlangıçta %6,5 seviyelerinde ölçüldü. XLPE ve LDPE'ye göre çok yüksek değerler elde edilmiştir başlangıç olarak. Halihazırda bu malzemenin kullanılma sebebi yandığında halojen içermeyen gazlar üretmesi ve duman yoğunluğunun düşük olmasıdır. Unutmayalım ki bu termoplastikler hala geliştirme aşamasında olan ve her geçen gün daha da iyi dielektrik performans sergilemesini beklediğimiz malzemelerdir.

Unutmayalım ki HFFR termoplastikler birçok malzemenin aynı potada eritilip ekstrüde edilmesiyle üretilmektedir. Bu karışımdaki her ürün, yalıtkanın performansına etki etmektedir. Ayrıca bu yalıtkanın üretiliş amacı şu an için alçak gerilim iç tesisat ve orta gerilim kılıf malzemesi olarak kullanılmasıdır. İleride belki bir orta gerilim izolasyonu olarak da kullanılacağını görebiliriz. Yaşlanmadan önceki kayıp güç grafiğiyle devam ediyoruz.



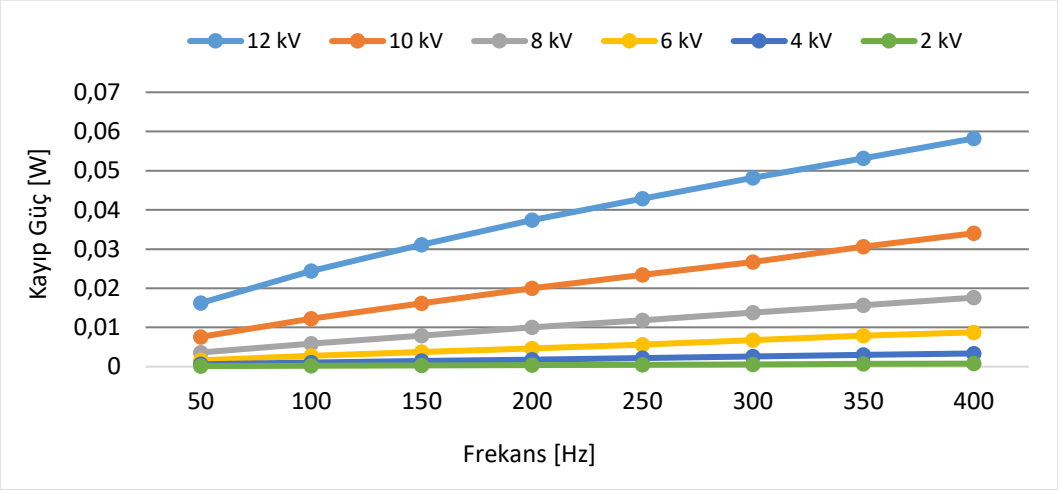
Şekil 4.54 HFFR yaşlandırma öncesi kayıp güç

170 mW civarında bir kayıp güç vardır 400 Hz 12 kV'da test ettiğimiz diğer numunelere göre daha yüksek değerdedir. Şimdi 1. hafta yaşlandırma sonuçlarına bakalım.



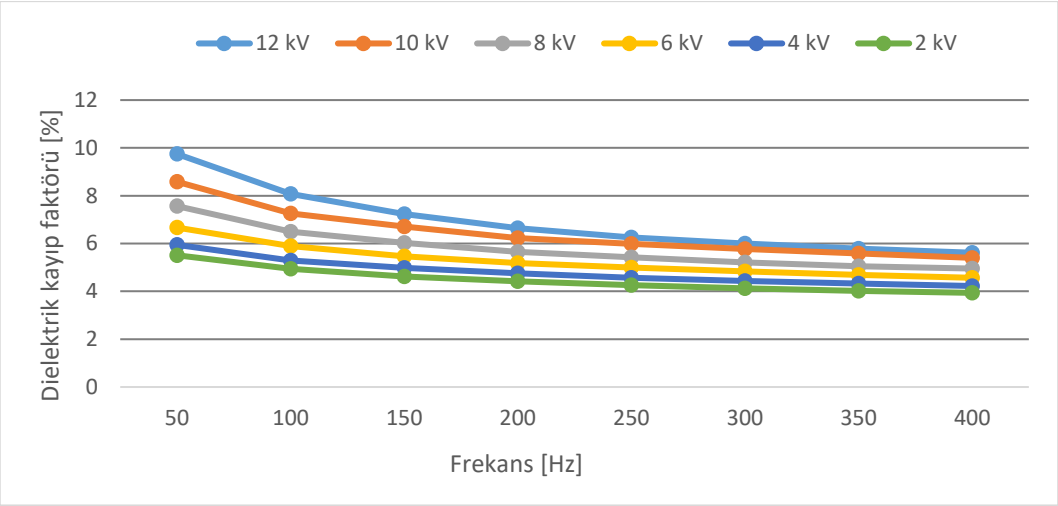
Şekil 4.55 HFFR dielektrik kayıp faktörü (Termal 1. Hafta yaşlandırma sonuçları)

İlk hafta sonunda sıcaklıkla beraber HFFR'nin dielektrik kayıp faktörü yarı yarıya düşmüştür. Sebepleri 4.4'te tartışılacaktır.



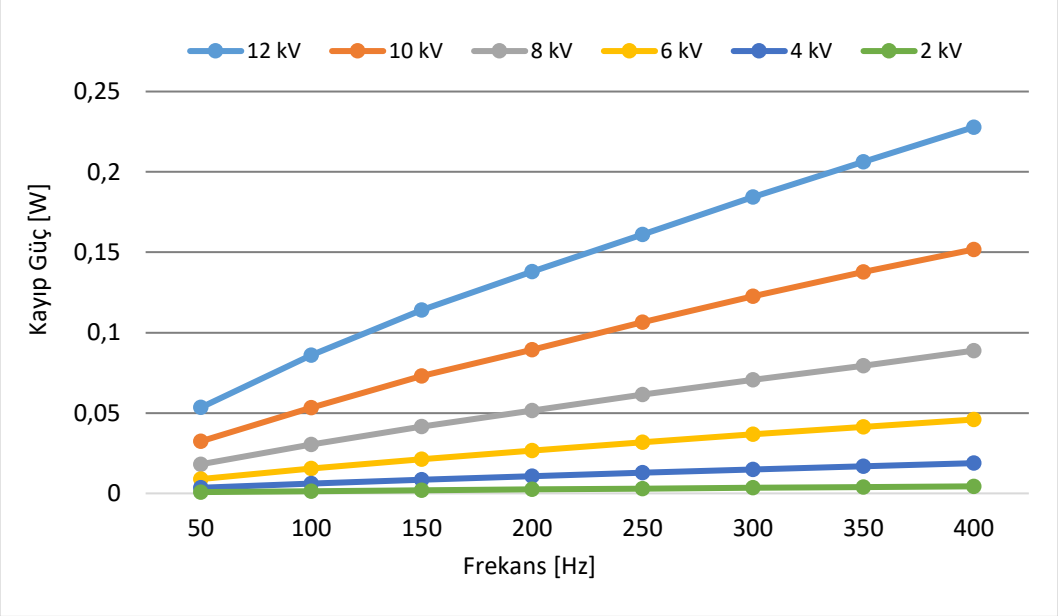
Şekil 4.56 HFFR kayıp güç (Termal 1. hafta yaşlandırma sonuçları)

Dielektrik kayıp faktörü gibi kayıp güç de yaklaşık olarak %50'den fazla düşmüştür. Şimdi nem etkisine göz atalım.



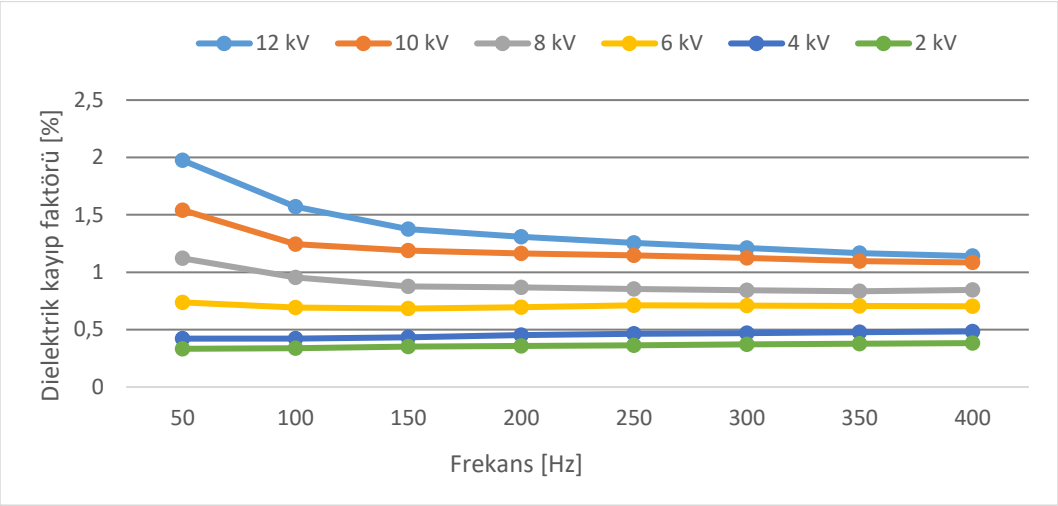
Şekil 4.57 HFFR dielektrik kayıp faktörü (Nem 1. Hafta yaşlandırma sonuçları)

Sıcaklık pozitif etki ederken, nemin önemli bir negatif etkisi gözlemlenmiştir. %6 seviyesindeki tan delta değeri %10 seviyelerine kadar çıkmıştır. Kayıp güçteki değişim aşağıdaki grafikte verilmiştir.



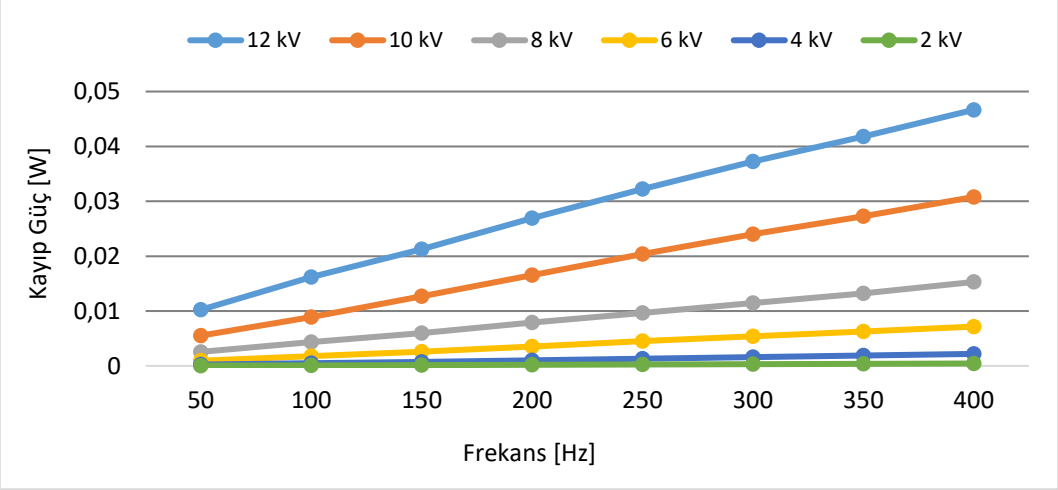
Şekil 4.58 HFFR kayıp güç (Nem 1. Hafta yaşlandırma sonuçları)

Kayıp güçte de belirgin bir artış olmuştur. 170 mW seviyesinden 230 mW seviyesine gelmiştir. 2. hafta sonuçları aşağıdaki gibi olmuştur.



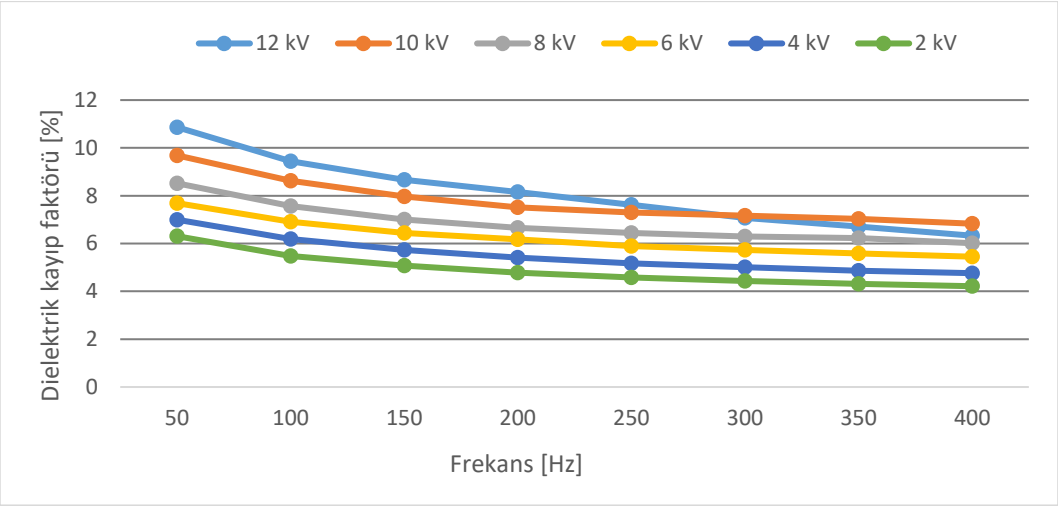
Şekil 4.59 HFFR dielektrik kayıp faktörü (Termal 2. Hafta yaşlandırma sonuçları)

2. hafta sonunda dielektrik kayıp faktöründe yeniden bariz bir iyileşme olmuştur. %3,2 seviyesinden %2 seviyesine düşmüştür 12 kV 400 Hz değerlerinde. Kayıp güç değeriyle devam edelim.



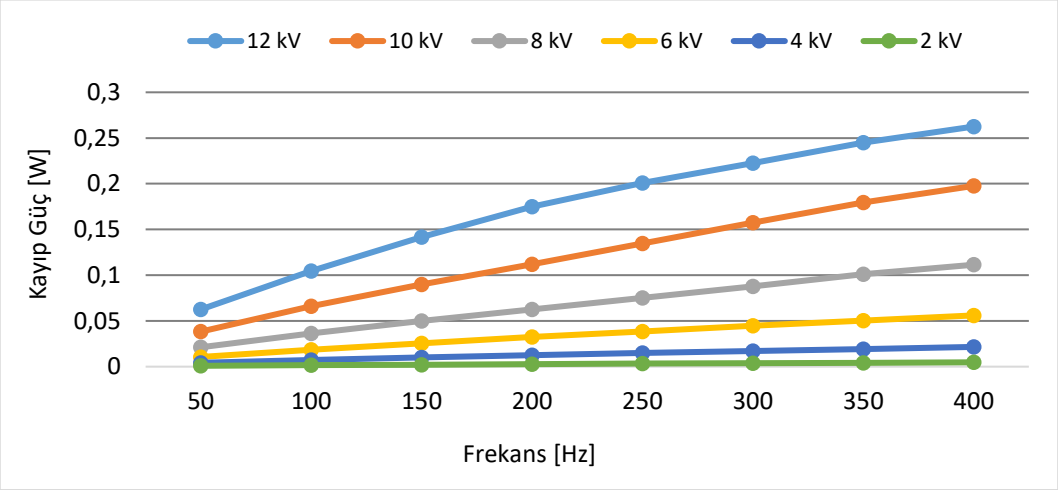
Şekil 4.60 HFFR kayıp güç (Termal 2. Hafta yaşlandırma sonuçları)

Kayıp güç 1. haftaki sonuçlara göre yine %50 seviyesinde bir düşüş göstermiştir. Yukarıda belirtildiği gibi bununa ilgili tartışma 4.4'te yapılacaktır. 2. hafta nem sonuçları aşağıdaki gibi olmuştur.



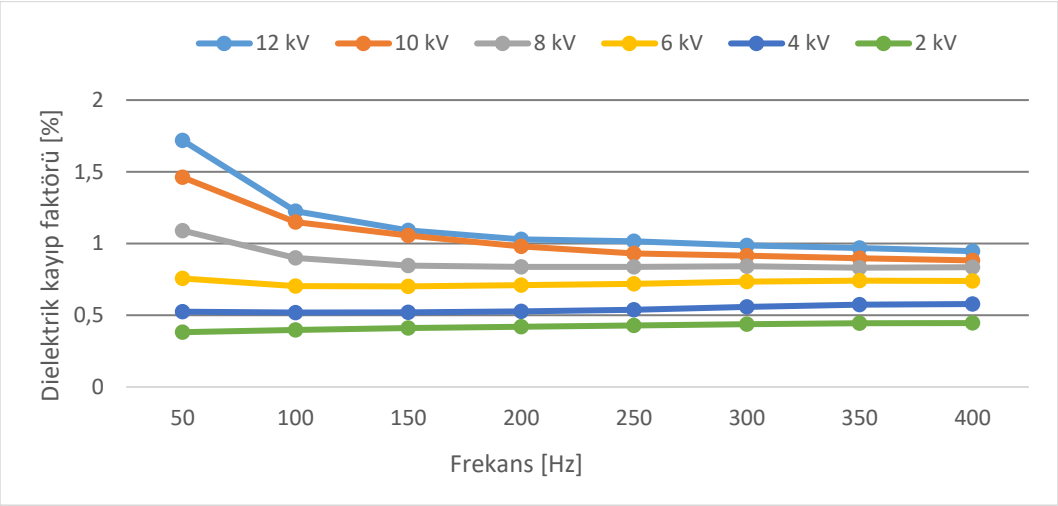
Şekil 4.61 HFFR dielektrik kayıp faktörü (Nem 2. Hafta yaşlandırma sonuçları)

Dielektrik kayıp faktöründeki bozulma nemle beraber devam etmektedir. Dramatik artışlar meydana gelmemiştir ancak bozulma devam etmektedir.



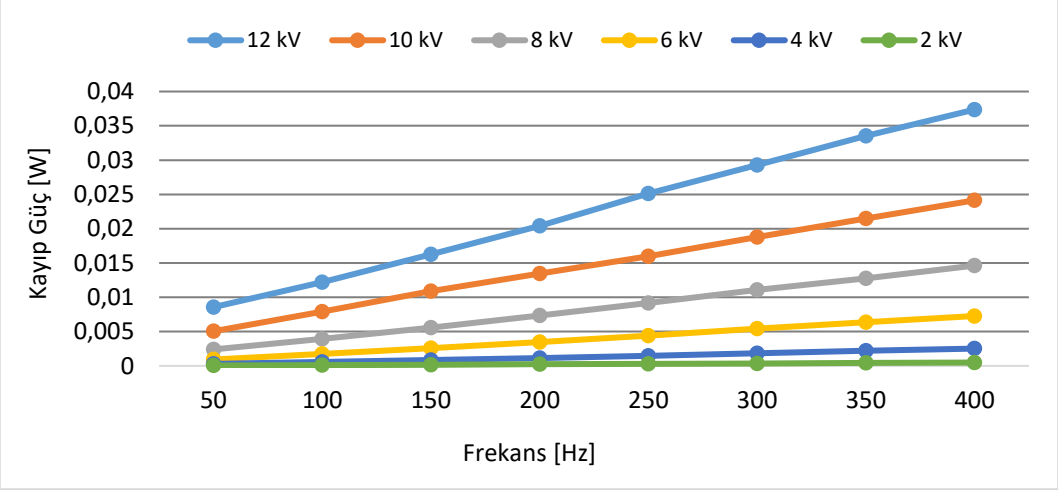
Şekil 4.62 HFFR kayıp güç (Nem 2. Hafta yaşlandırma sonuçları)

Güç kayıpları 270 mW seviyesine gelmiş durumdadır. Nemin HFFR üzerindeki etkisi giderek artmaktadır. 3. hafta sıcaklık yaşlandırması sonuçlarıyla devam ediyoruz.



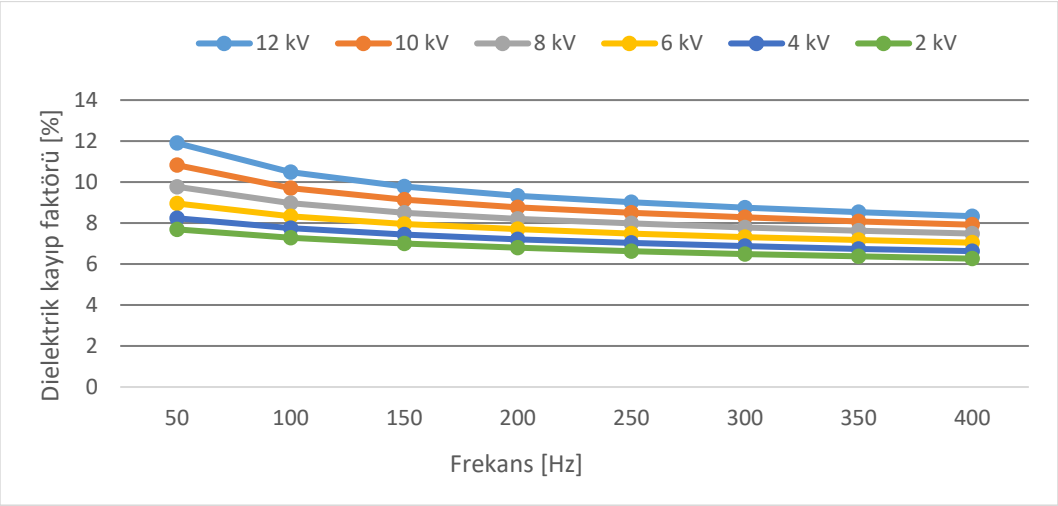
Şekil 4.63 HFFR dielektrik kayıp faktörü (Termal 3. Hafta yaşlandırma sonuçları)

Dielektrik kayıp faktörü değerleri önceki haftadan bir miktar daha iyi olmuştur. Ancak bu noktada diğer haftalardaki kadar belirgin bir iyileşme gözlemlenmemiştir. Kayıp güç grafiğiyle devam edelim.



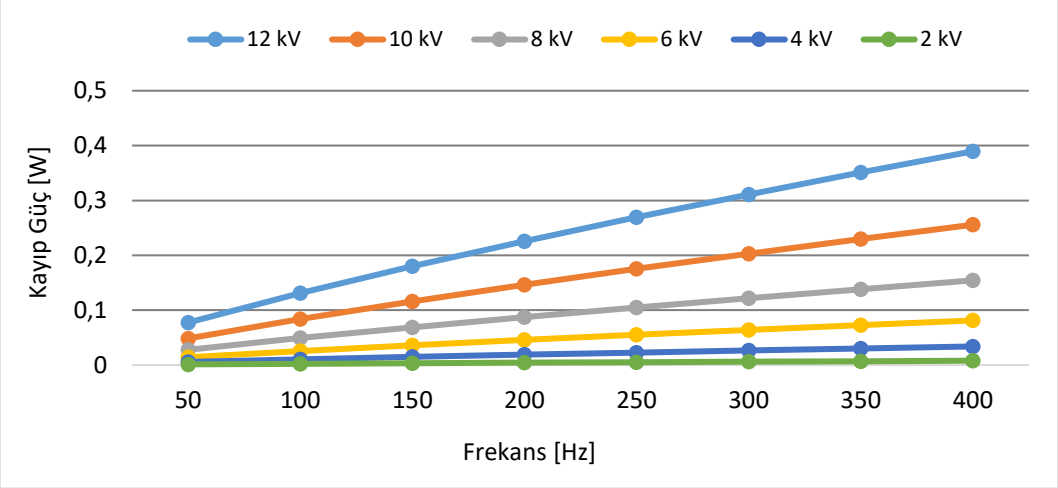
Şekil 4.64 HFFR kayıp güç (Termal 3. Hafta yaşlandırma sonuçları)

En yüksek kayıp güç 3 hafta yaşlandırma sonrasında 2. haftadaki seviyesinden 37 mW seviyesine gerilemiştir. 3 hafta sonrasındaki nem yaşlandırma değerleriyle devam edelim.



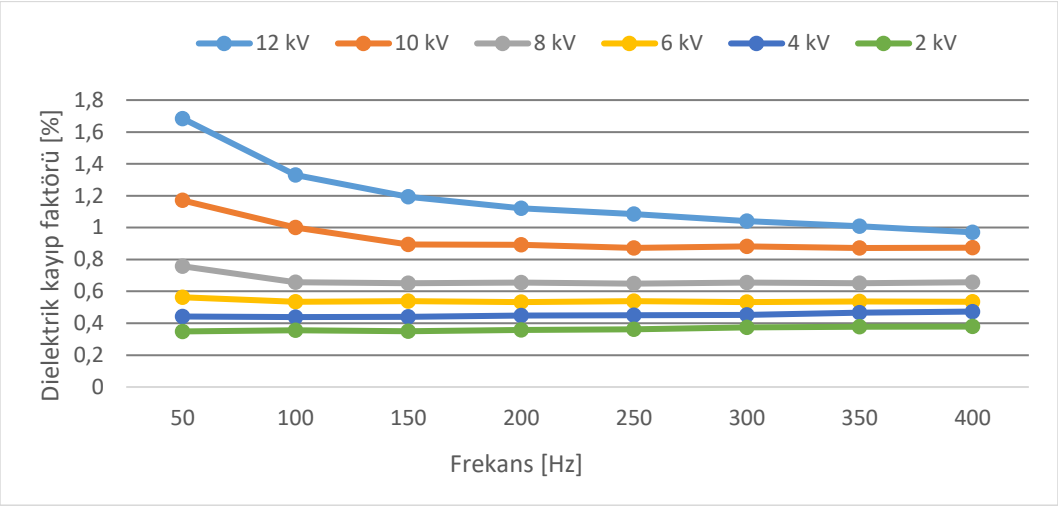
Şekil 4.65 HFFR dielektrik kayıp faktörü (Nem 3. Hafta yaşlandırma sonuçları)

Dielektrik kayıp faktörünün nemle beraber geçen 3 hafta sonunda 50 Hz 12 kV değerinde %12 seviyesine ulaştığı görülmüştür. Sonraki grafikte kayıp güç değişimini görebiliriz. 50 Hz 2 kV değerinde %6 civarında olan değer %8 civarına yükselmiştir.

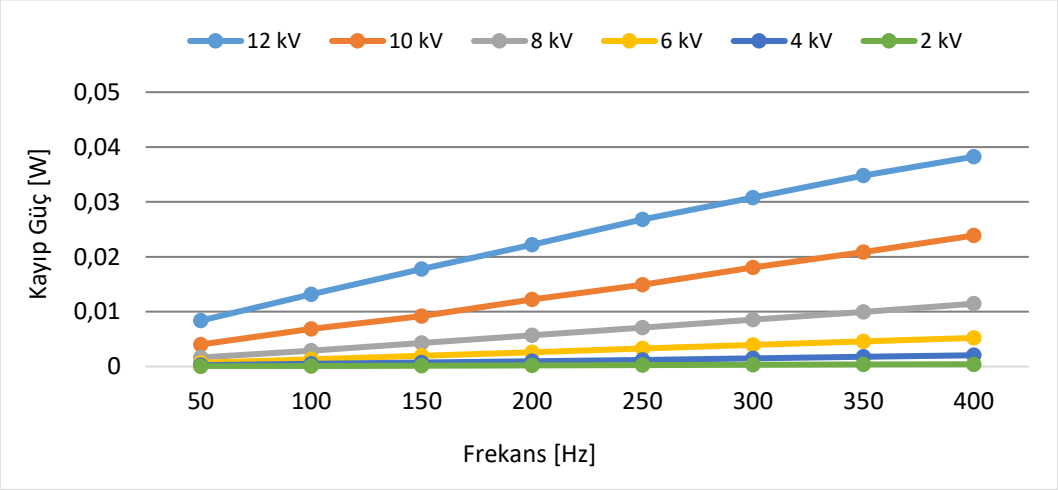


Şekil 4.66 HFFR kayıp güç (Nem 3. Hafta yaşlandırma sonuçları)

Nem etkisinin artış hızı bu kısımda hızlanmış. Kayıp güç 400 mW seviyesine ulaşmıştır. 4.hafta termal yaşlandırma sonuçlarıyla devam edelim.

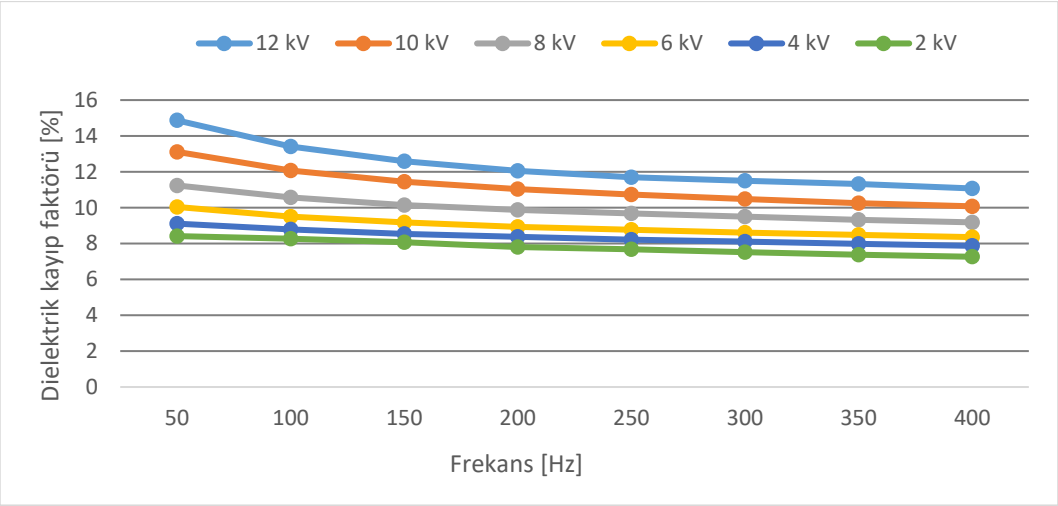


Şekil 4.67 HFFR dielektrik kayıp faktörü (Termal 4. Hafta yaşlandırma sonuçları)

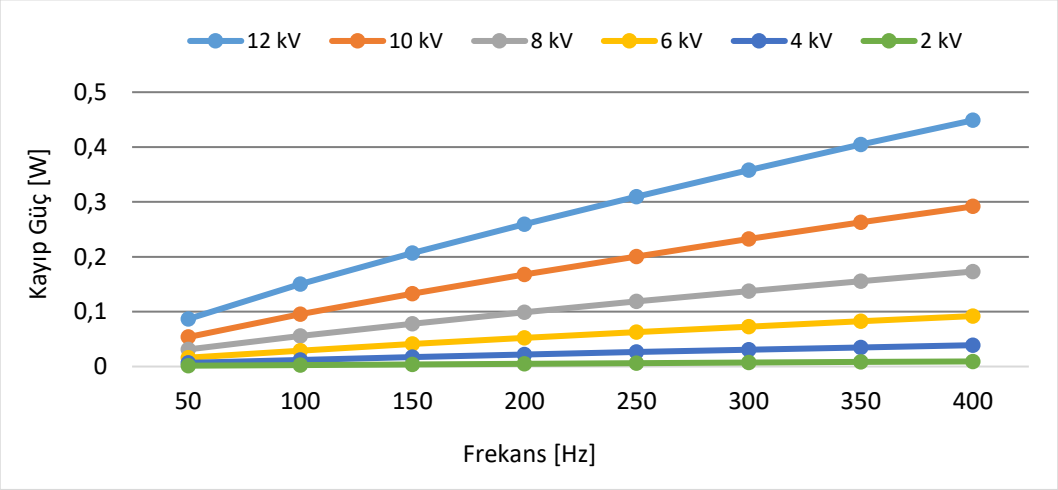


Şekil 4.68 HFFR kayıp güç (Termal 4. Hafta yaşlandırma sonuçları)

4.haftada dielektrik kayıp faktöründeki iyileşme durmuş vaziyettedir. Şekilde kayıp güç de 38 mW seviyesinde durmuştur. Son 1 haftadaki termal yaşlandırma termoplastiği etkilememiştir. Sıcaklıkla beraber HFFR'de oluşan kimyasal değişimlerin durması bu sonucu oluşturmuş olabilir. 4.hafta nem sonuçları aşağıda verilmiştir.

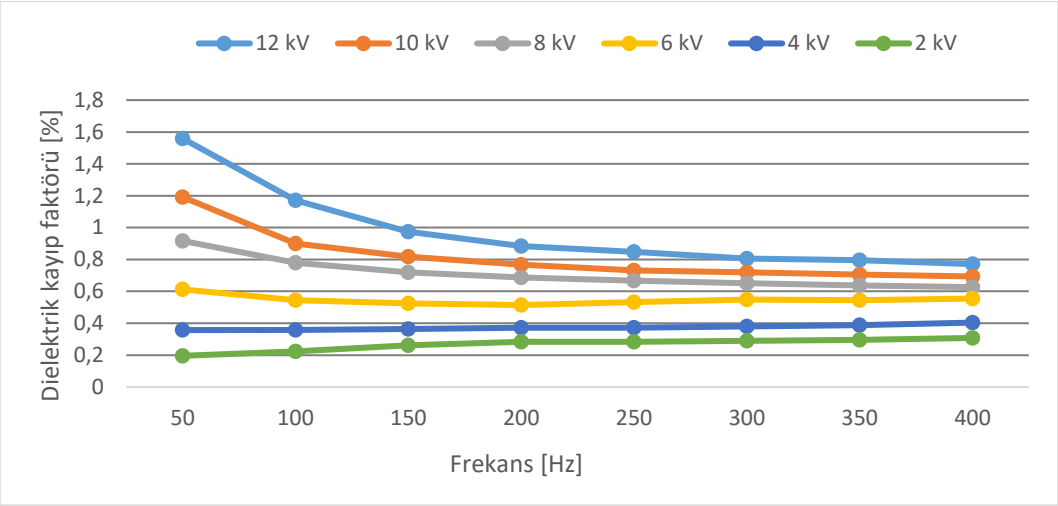


Şekil 4.69 HFFR dielektrik kayıp faktörü (Nem 4. Hafta yaşlandırma sonuçları)

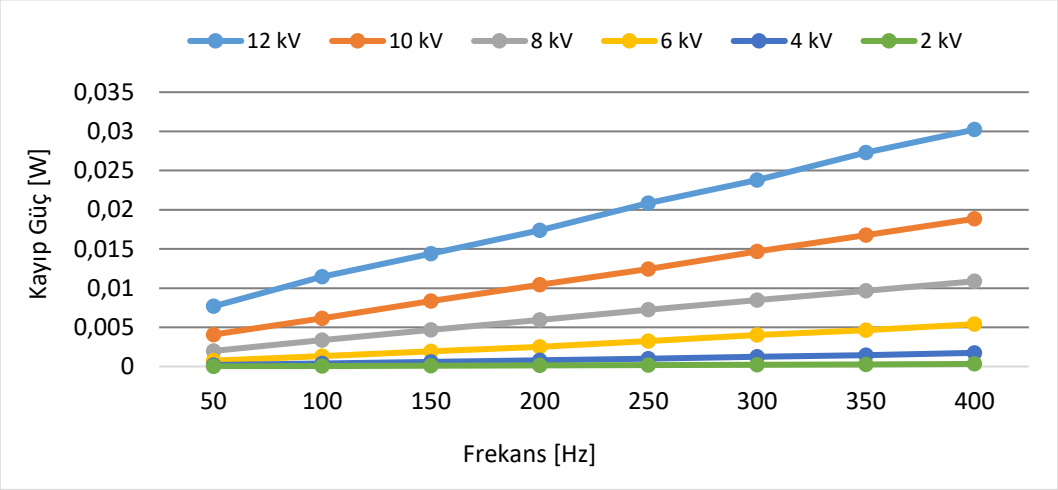


Şekil 4.70 HFFR kayıp güç (Nem 4. Hafta yaşlandırma sonuçları)

Nem yaşlandırmasının etkisi 4.haftada da bariz bir şekilde dielektrik kayıp faktörü değerlerini değiştirmektedir. 50 Hz 12 kV'da %12 seviyesindeki değer %15 seviyesine yükselmiş durumdadır. 400 Hz 12 kV değerindeki kayıp güç 450 mW seviyesine yükselmiştir. 5.hafta termal yaşlandırma verileriyle devam edilmiştir.

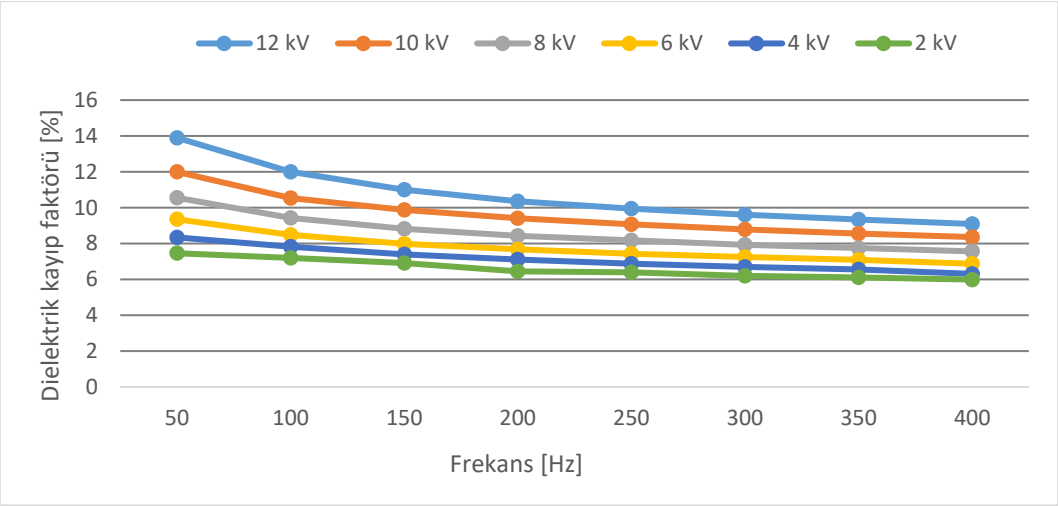


Şekil 4.71 HFFR dielektrik kayıp faktörü (Termal 5. Hafta yaşlandırma sonuçları)

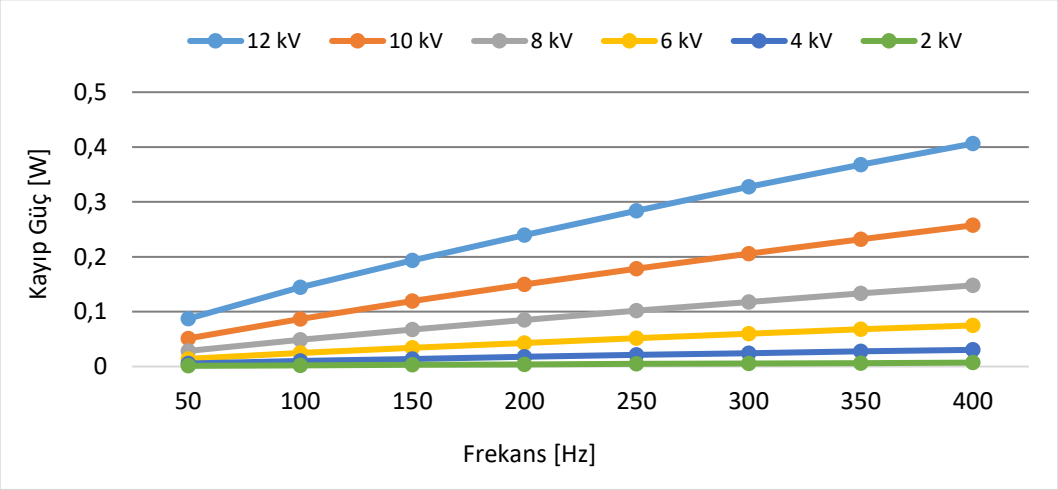


Şekil 4.72 HFFR kayıp güç (Termal 5. Hafta yaşlandırma sonuçları)

5.haftada da bariz bir değişim söz konusu olmasa bile hala dielektrik kayıp faktörü değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Kayıp güçte de bariz bir değişim olmasa da 12 kV 400 Hz değerinde 38 mW seviyesinden 32 mW seviyesine gerileme söz konusudur. 5.hafta nem yaşlandırması sonuçlarıyla devam edilmiştir.

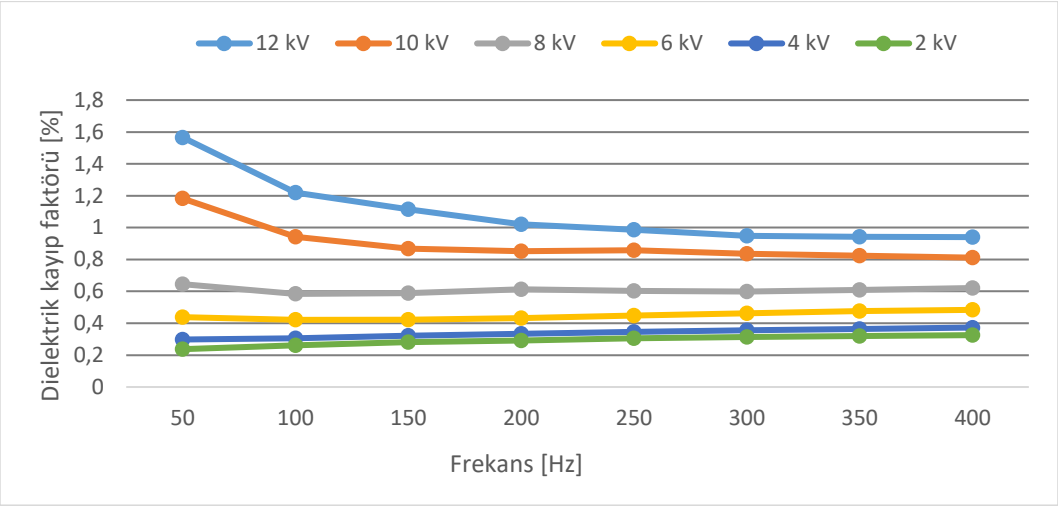


Şekil 4.73 HFFR dielektrik kayıp faktörü (Nem 5. Hafta yaşlandırma sonuçları)

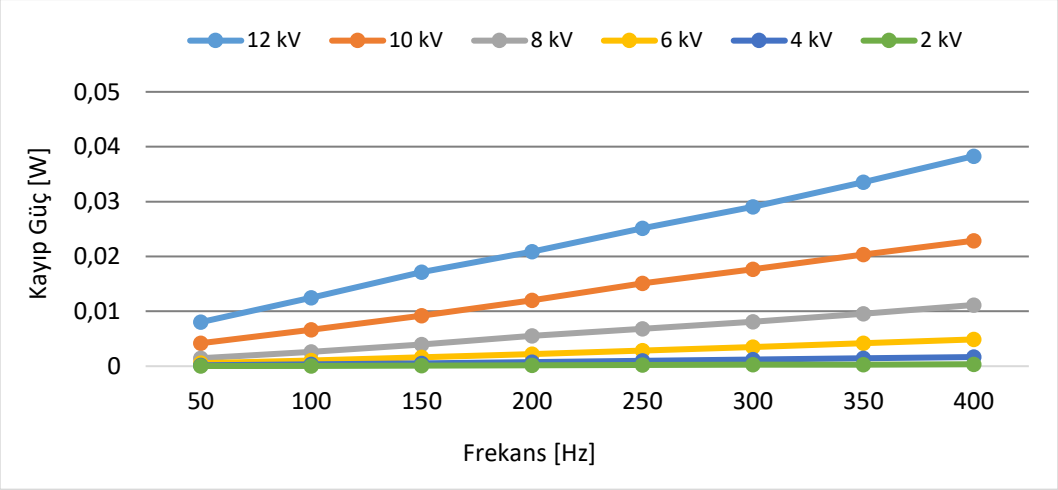


Şekil 4.74 HFFR kayıp güç (Nem 5. Hafta yaşlandırma sonuçları)

İlk defa 5.haftada nem yaşlandırması sonucu bariz bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Hatta dielektrik kayıp faktörü ve kayıp güç değerlerinde %5 civarında bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu durumun nedeni malzemenin artık H_2O'ya doygun hale gelmesi ve daha fazla molekülün içeriye nüfuz edememesiyle açıklanabilir. 6.hafta termal yaşlandırma sonuçları aşağıdaki gibi olmuştur.

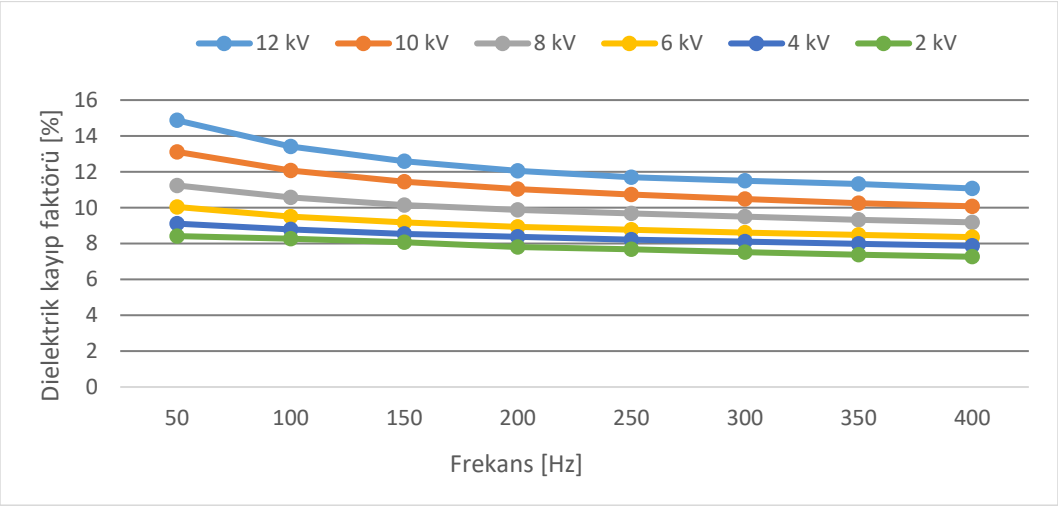


Şekil 4.75 HFFR dielektrik kayıp faktörü (Termal 6. Hafta yaşlandırma sonuçları)

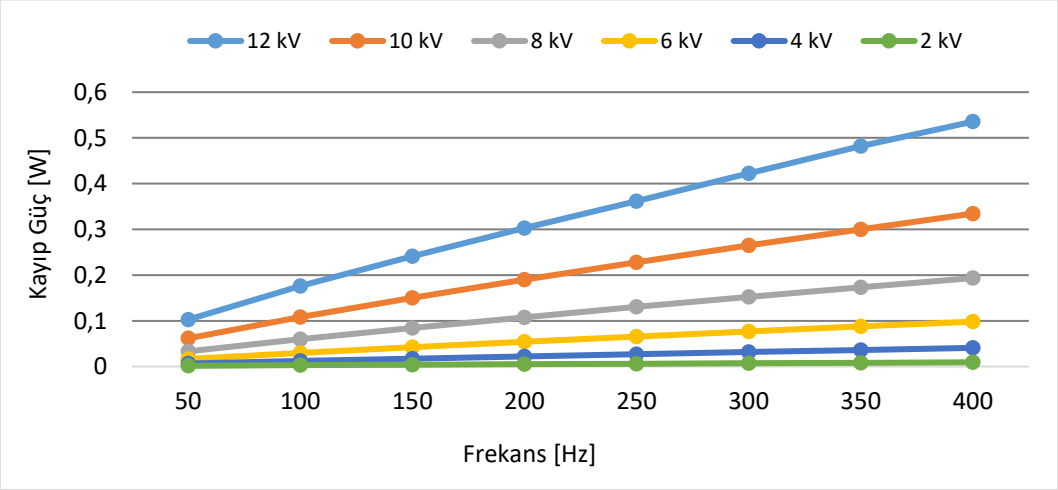


Şekil 4.76 HFFR kayıp güç (Termal 6. Hafta yaşlandırma sonuçları)

6.haftada da termal yaşlandırmaya bağlı dielektrik kayıp faktörü değerinde bariz bir değişim gözlemlenmemiş. Hatta bu noktadan sonra artık malzemenin daha kötüye gitme eğiliminde olduğunu söyleyebiliriz. Kayıp güçte bariz bir yükselme olmuş 30 mW civarından 40 mW civarına yükselmiştir. Deneyler burada noktalansa bile daha uzun yaşlandırma çalışmalarında belirli bir noktadan sonra bu değerin kötüleşeceği muhakkaktır. Buraya kadar olan kısımdaki tahmini açıklamalar bölüm 4.4'de bulunmaktadır. 6.hafta nem sonuçlarıyla devam edilmiştir.



Şekil 4.77 HFFR dielektrik kayıp faktörü (Nem 6. Hafta yaşlandırma sonuçları)



Şekil 4.78 HFFR kayıp güç (Nem 6. Hafta yaşlandırma sonuçları)

6.haftada da dielektrik kayıp faktöründe büyük bir değişiklik gözlemlenmemiştir. En yüksek değişimin olduğu 50 Hz 12 kV değerinde %5'lik bir artış gözlemlenmiştir, dielektrik kayıp faktörü %14'den %15 seviyesine yaklaşmıştır. Kayıp güçte ise 400 Hz 12 kV değerinde bariz bir değişim söz konusudur. 400 mW civarından 500 mW üstüne çıkmış durumdadır. Böylelikle 6 haftalık dielektrik kayıp faktörü ve kayıp güç değerleri ölçümü tamamlanmıştır. Genel değerlendirme bölüm 4.4'de yapılacaktır. Bu kısımda gösterilen test sonuçlarında genel olarak termal yaşlanmayla beraber HFFR haricindeki numunelerin değerlerinin kötüye gittiği gözlemlenmiştir. Nem yaşlandırması ise hepsini negatif olarak etkilemiş durumdadır. Özellikle HFFR nemden en çok etkilenen yalıtkan olmuştur.

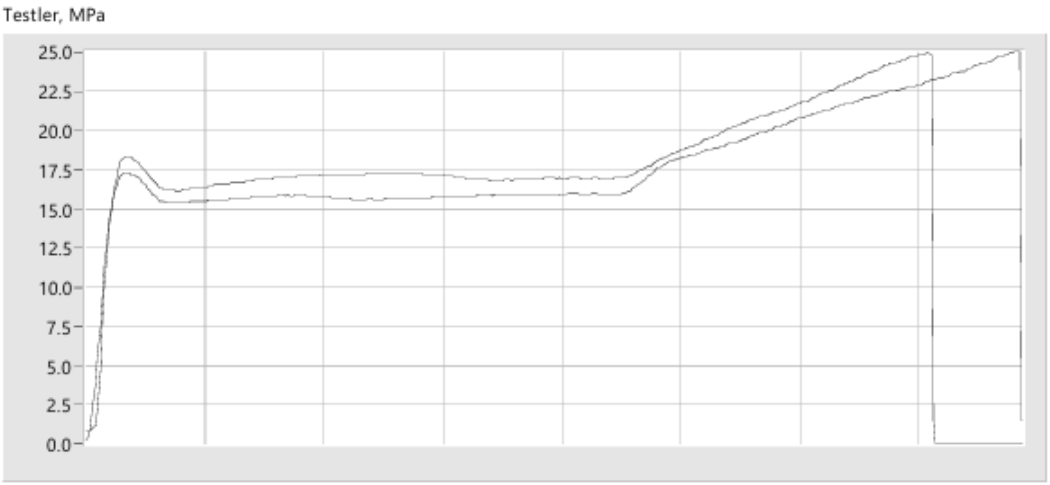
4.2 Çekme Kopma Testleri Deney Sonuçları

Çekme kopma testleri yaşlandırılmış numuneler üzerinde çokça yapılmıştır [57] [58]. Yalıtkanların tek görevi elektrik izolasyonunu sağlamak değildir, aynı zamanda iletkeni fiziksel ve kimyasal etkilerden koruması gerekmektedir. Aynı zamanda yeraltı kabloları sürekli bir doğrusal hat şeklinde duramamaktadır. Deprem, yol çalışması gibi sebeplerle fiziksel strese maruz kalmaktadır. Bu durumda yalıtkanın esnekliğini koruması, elektrik alan bir noktada yoğunlaştığında dielektrik özelliklerini koruyabilmesi ve kopmaması gerekir. Şüphesiz yalıtkan yaşlandıkça uzama miktarı ve kopma kuvveti azalacaktır.

Şimdi Sırasıyla XLPE, LDPE ve HFFR yalıtkanların çekme kopma kuvveti test sonucunu paylaşalım. Her bir yalıtkan türünden 2 adet yaşlandırmaya maruz bırakılmamış, 2 adet termal yaşlandırılmış, 2 adet de nemde yaşlandırılmış numune test edilmiştir. Ölçümlerin aritmetik ortalaması alınıp tablo hazırlanmıştır.

4.2.1 XLPE Deney Sonuçları

Yaşlandırma öncesi çekme kopma deney sonuçları aşağıda gösterilmiştir. Deneyler IEC 60811-501 [42] standartına uygun olarak Türkak tarafından akredite edilmiş bir kablo firmasının laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.



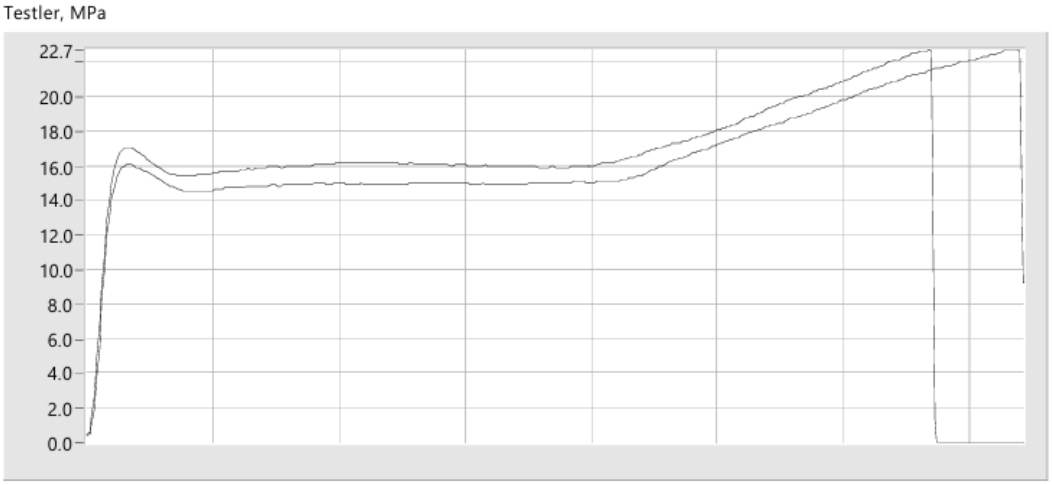
Şekil 4.79 XLPE yaşlanma öncesi çekme dayanımı

2 numune de yaklaşık olarak aynı çekme kuvvetinde kopmuştur. Alınan sonuçlar literatürde alınan sonuçlarla benzeşmektedir. Tablo 4.1'da sayısal değerler standart sapma ve ortalama değerler gösterilmiştir.

Tablo 4.1 XLPE yaşlanma öncesi uzama miktarı ve çekme dayanımı

İstatistik	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama Miktarı (%)
Maksimum	25,025	538,549
Minimum	24,905	487,28
St. Sapma	0,06	25,635
Ortalama Değer	24,965	512,915

Ortalama 24.965 MPa kopma kuvveti ve %512.915 uzama miktarı elde edilmiştir. Şimdi termal yaşlandırma numunelerinin sonuçlarına bakalım. Çekme kopma testleri 3 haftalık numuneler üzerinde yapılmıştır. Yani 3 hafta termal yaşlandırılmış 2 numune ve 3 hafta nemde yaşlandırılmış 2 numunenin test raporları paylaşılacaktır.



Şekil 4.80 XLPE termal yaşlandırma 3.hafta çekme dayanımı

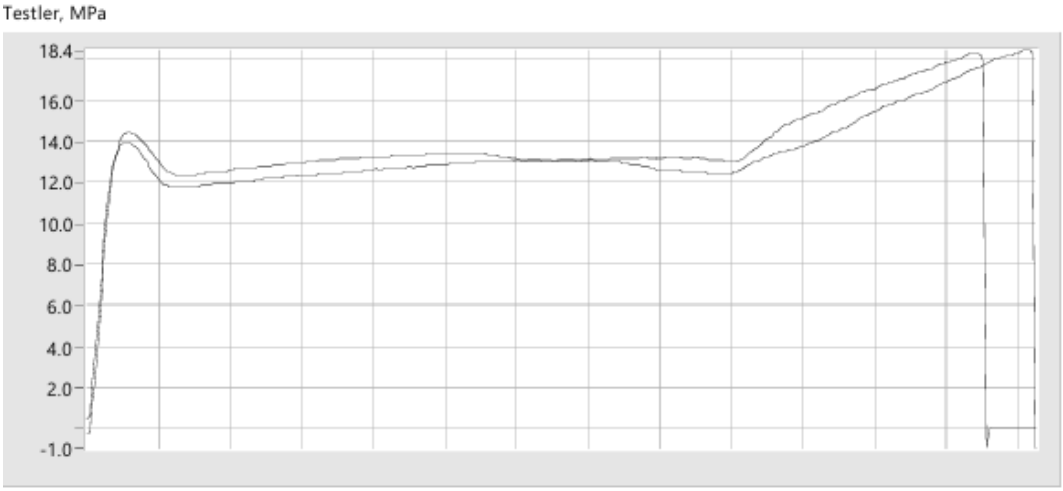
Termal yaşlandırma sonrasında çekme dayanımı ortalama 22,664 MPa değerine düşmüştür. Yani %9,2 çekme dayanımı düşüşü yaşanmıştır. Uzama miktarı için Tablo 4.2'ye göz atabilirsiniz.

Tablo 4.2 XLPE termal yaşlanma 3.hafta uzama miktarı ve çekme dayanımı

İstatistik	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama Miktarı (%)
Maksimum	22,687	508,834
Minimum	22,641	459,016
St. Sapma	0,023	24,909
Ortalama Değer	22,664	483,925

Uzama miktarı %483.925 olmuştur. Yani %5,6 uzama miktarı düşmüştür. 3 haftalık termal yaşlandırmanın XLPE'nin uzamasında nerdeyse hiç etkili olmadığını görüyoruz. Fiziksel olarak bu kadar dayanıklı olması XLPE'nin orta gerilim izolasyonu olarak seçilmesinin temel nedenlerinden biridir.

Bir de XLPE'nin 3 haftalık nem yaşlandırması sonuçları aşağıdaki grafik ve tabloda gösterilmiştir.



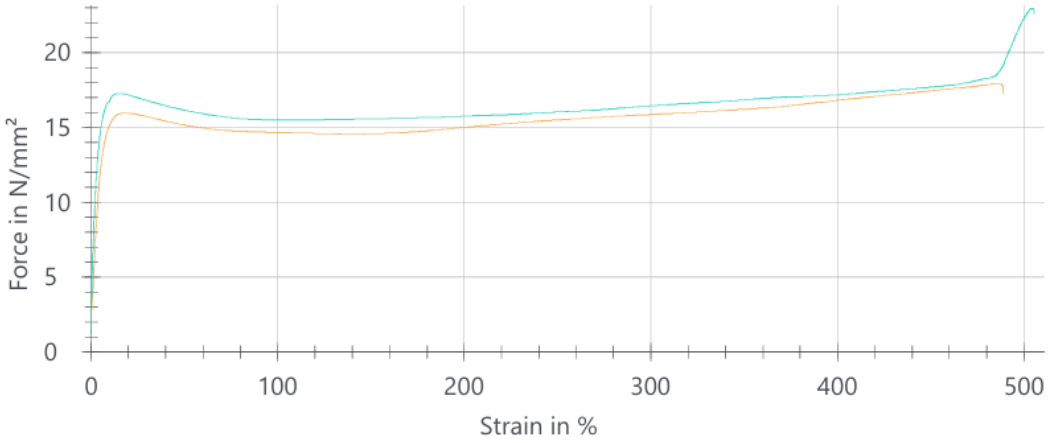
Şekil 4.81 XLPE nem yaşlanması 3.hafta çekme dayanımı

3 hafta boyunca %85 bağıl nem ve 45 °C sıcaklığa maruz kalan XLPE'nin çekme dayanımında 24.965 MPa'dan 18.338 MPa'ya düşüş olmuştur. %26,5'lik ciddi bir çekme dayanımı düşüşü olmuştur. Uzama miktarına Tablo 4.3'te gösterilmiştir.

Tablo 4.3 XLPE nem yaşlanması 3.hafta uzama miktarı ve çekme dayanımı

İstatistik	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama Miktarı (%)
Maksimum	18,429	451,036
Minimum	18,248	427,824
St. Sapma	0,091	11,606
Ortalama Değer	18,338	439,43

Uzama miktarı %512,915'ten %439,43'e düşmüştür. 3 haftalık nem yaşlandırması sonucunda %14,3'lük bir uzama miktarı düşüşü görülmüştür. XLPE 6. hafta sonuçlarıyla devam edelim.



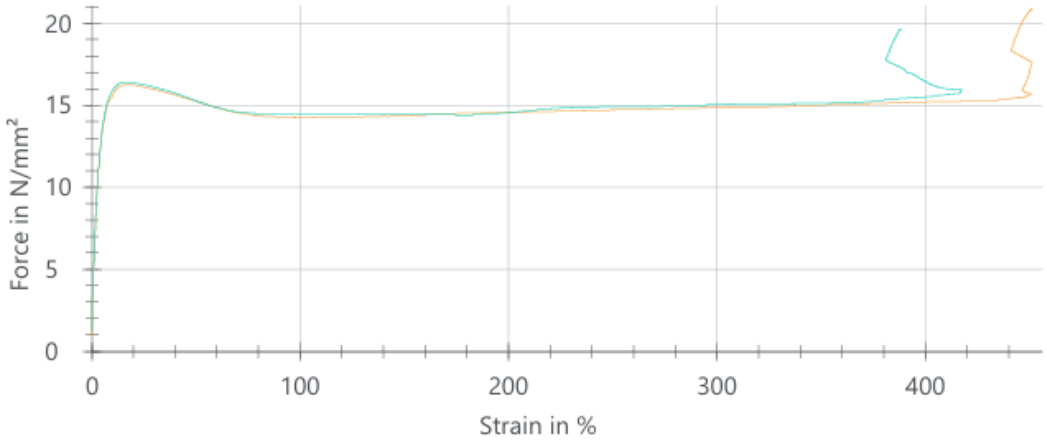
Şekil 4.82 XLPE termal yaşlandırma 6.hafta çekme dayanımı

Ortalama çekme kuvveti 20,4645 MPa değerine düşmüştür. Artık oksijen ve sıcaklık etkisiyle polimerin fiziksel dayanımının da zamanla bozulduğunu gözlemliyoruz. Ancak hala 3 haftalık nem yaşlandırmasına maruz bırakılmış numunelerin çok daha üstünde bir çekme dayanımına sahi olduğunu görüyoruz.

Tablo 4.4 XLPE termal yaşlanma 6.hafta uzama miktarı ve çekme dayanımı

İstatistik	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama Miktarı (%)
Maksimum	21,011	505,513
Minimum	19,918	488,844
St. Sapma	1,093	16,669
Ortalama Değer	20,4645	497,178

6. hafta sonunda uzama miktarında bir değişiklik olmamış hatta çok küçük bir miktarda yükselme gözlemlenmiştir. Bu açıdan XLPE'nin sıcaklık koşullarında çok stabil olduğunu söyleyebiliriz. 6 haftalık nem yaşlandırması sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.83 XLPE nem yaşlanması 6.hafta çekme dayanımı

Nem yaşlandırması sonunda çekme dayanımının gerilemesi durmuş, hatta iyileşmiş durumdadır. Bunun sebebi muhtemelen nem kabininden çıkan numunelerin kabinden çıkmasıyla test edilmesi arasında geçen sürede oda koşullarında nemin numuneden buharlaşarak uzaklaşmasıdır. Bu noktada numuneler kabinden çıkarılır çıkarılmaz test edilmesi gerektiği ortaya çıkmıştır. Neme doyduktan sonra XLPE'nin bir noktada çekme dayanımının sabitleneceği öngörülmektedir. Ancak burada ortam koşullarının düzelmesiyle beraber değerlerin iyileştiğini de göstermiş olduk.

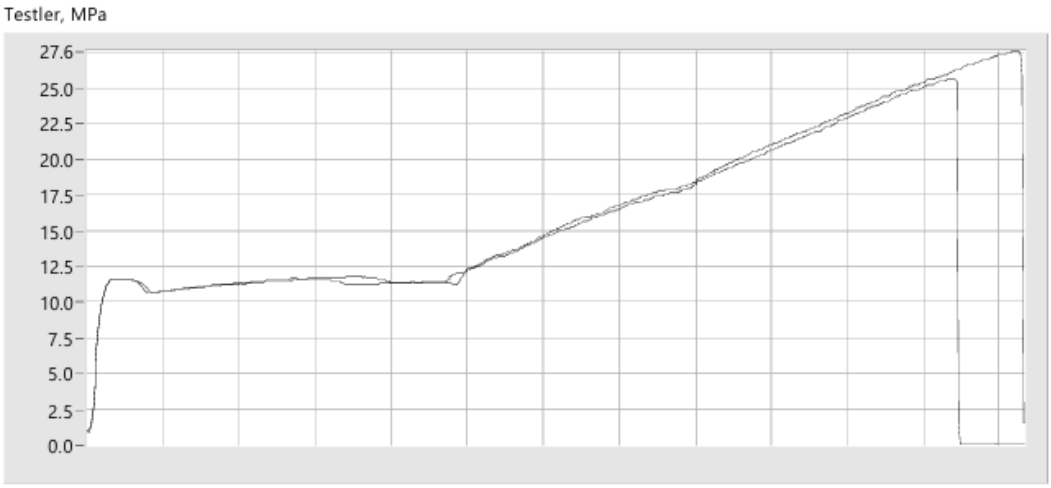
Tablo 4.5 XLPE nem yaşlanması 6.hafta uzama miktarı ve çekme dayanımı

İstatistik	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama Miktarı (%)
Maksimum	20,913	421,003
Minimum	19,641	417,915
St. Sapma	1,272	3,088
Ortalama Değer	20,277	419,459

Uzama miktarında kayda değer bir değişim olmamış yalnızda %10 civarında bir düşüş yaşanmıştır. Toplan yaşlanma etkisini düşündüğümüzde nemin uzama miktarı üzerindeki etkisi yaklaşık %20 olmuştur. Kendi çalışma koşullarından bundan çok daha az neme maruz kaldığını düşünürsek, neme karşı dayanıklı olduğunu söyleyebiliriz. DCP ile üretilen XLPE örneklerinin de bu tip bir teste maruz bırakılıp ne kadar etkilendiğini gözlemlemek çok yerinde olacaktır. Bilindiği gibi silan bağlı XLPE'ler DCP ile üretilenlerine göre fiziksel ve kimyasal etkilere karşı daha dayanıksız olmaktadır.

4.2.2 LDPE Deney Sonuçları

LDPE aynı zamanda XLPE üretiminde hammadde olarak kullanılmaktadır. XLPE'nin çapraz bağlanmamış hali diyebiliriz. Çok esnek ve dayanıklı bir malzeme olması sebebiyle çekme kopma deneylerinde iyi sonuçlar elde edilmiştir. Günümüzde çoğunlukla bu esnek yapısını koruması gereken yerlerde kullanılmaktadır, ambalajlar, streç filmler, poşetler bu hammaddeyle yapılmaktadır. Şimdi LDPE yaşlanma öncesi değerleri görelim.



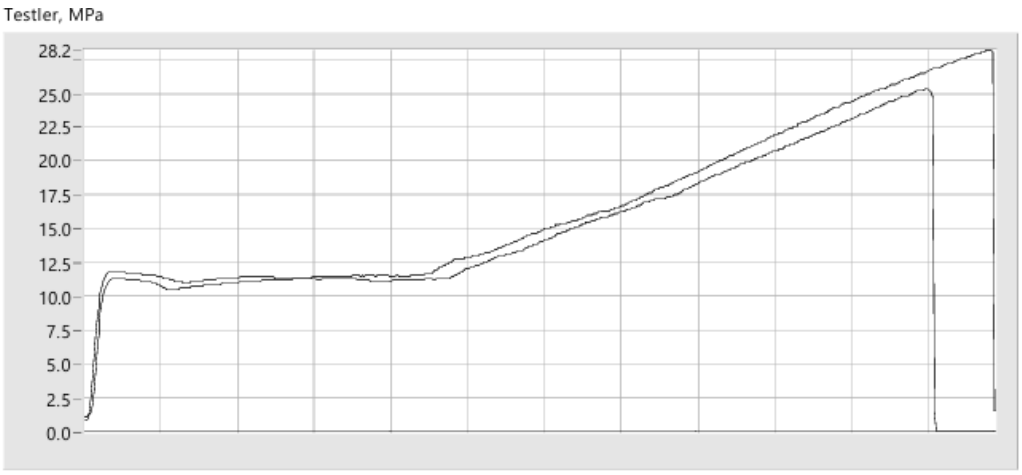
Şekil 4.84 LDPE yaşlanma öncesi çekme dayanımı

Yaşlanma öncesi uzama miktarlarını Tablo 4.6'te görebiliriz.

Tablo 4.6 LDPE yaşlanma öncesi uzama miktarı ve çekme dayanımı

İstatistik	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama Miktarı (%)
Maksimum	27,564	846,632
Minimum	25,626	788,187
St. Sapma	0,969	29,223
Ortalama Değer	26,595	817,409

Çekme dayanımı yaklaşık olarak XLPE ile aynı çıkmıştır. Normalde daha düşük olması beklenir. Ancak yaptığımız deneylerde beklenenden daha yüksek çekme dayanımıyla karşılaştık. LDPE termal yaşlanma sonrası değerlerle devam edelim.



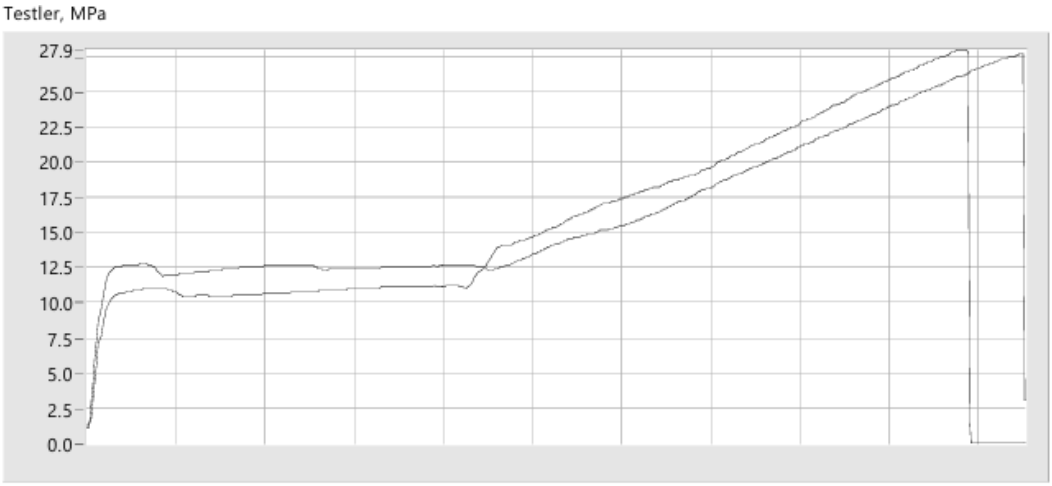
Şekil 4.85 LDPE termal yaşlandırma 3.hafta çekme dayanımı

Tablo 4.7 LDPE termal yaşlanma 3.hafta uzama miktarı ve çekme dayanımı

İstatistik	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama Miktarı (%)
Maksimum	28,165	814,093
Minimum	25,258	762,124
St. Sapma	1,454	25,984
Ortalama Değer	26,711	788,109

Çekme dayanımı termal yaşlanma sonrası neredeyse hiç değişmemiştir. Bunun sebebinin ne olabileceği Bölüm 4.4'te tartışılacaktır. Ancak bu tip esnek termoplastiklere çekme kopma kuvveti testi yerine hot set testi (IEC 60811-507:2012)[59] yapmak daha etkili bir sonuç verebilir.

Yaşlanma öncesi çekme dayanımı 26.595 MPa olan LDPE 3 haftalık termal yaşlanma sonrasında 26.711 MPa olmuştur. %0,4'lük bir değişime karşılık gelmiştir. Nerdeyse hiç değişiklik göstermemiştir. Uzama miktarı %817.409'dan %788.109'a düşmüştür. Yani %3,5'lik bir düşüşe karşılık gelen bu oran, ölçüm toleransını da düşündüğünüzde nerdeyse hiç değişiklik göstermemiş diyebiliriz. Bir de nem yaşlandırması sonucunda LDPE değerlerinin nasıl değiştiğine bakalım.

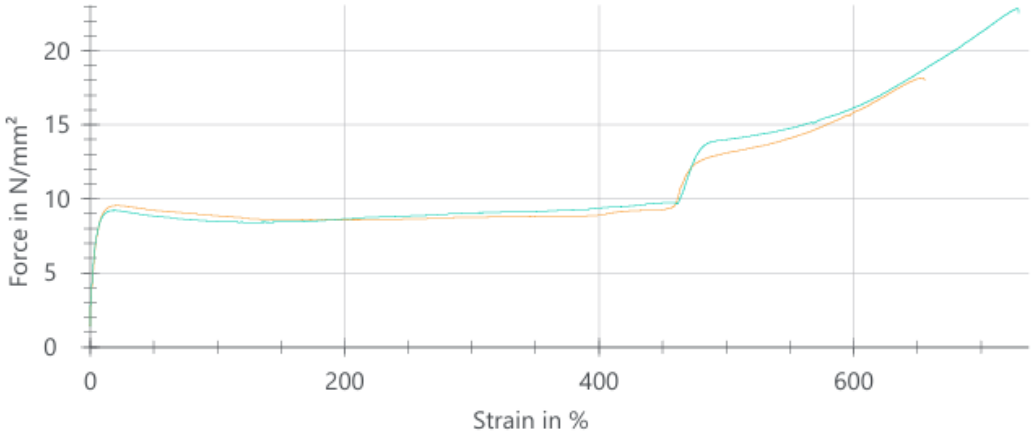


Şekil 4.86 LDPE nem yaşlanması 3.hafta çekme dayanımı

Tablo 4.8 LDPE nem yaşlanması 3.hafta uzama miktarı ve çekme dayanımı

İstatistik	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama Miktarı (%)
Maksimum	27,923	722,876
Minimum	27,664	679,767
St. Sapma	0,129	21,554
Ortalama Değer	27,793	701,321

Yaşlanma öncesi çekme dayanımı 26.595 MPa olan LDPE, nem yaşlandırması sonrasında 27.793 MPa'a çıkmıştır. Yine ölçüm toleransları içinde düşünüldüğünde yaşlandırmadan etkilenmediğini söyleyebiliriz. 6.hafta sonundaki değerler aşağıda verilmiştir.

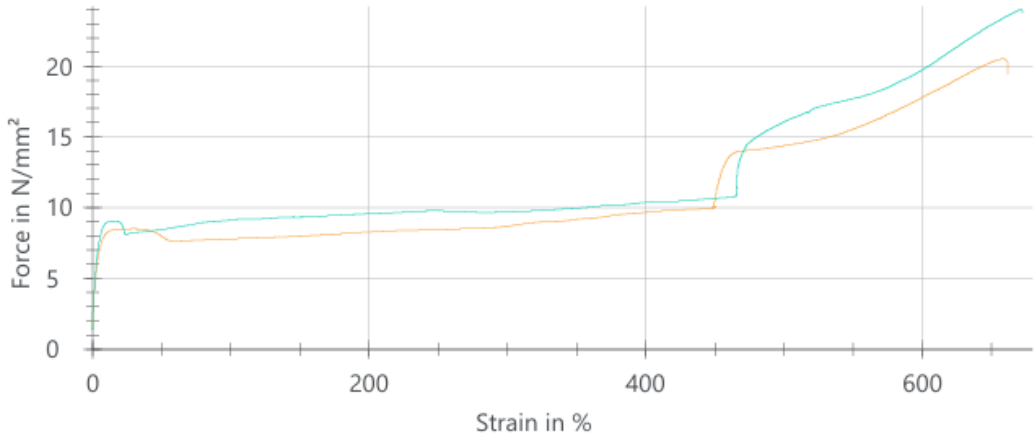


Şekil 4.87 LDPE termal yaşlandırma 6.hafta çekme dayanımı

Tablo 4.9 LDPE termal yaşlanma 6.hafta uzama miktarı ve çekme dayanımı

İstatistik	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama Miktarı (%)
Maksimum	20,915	699,889
Minimum	20,257	686,033
St. Sapma	0,658	13,856
Ortalama Değer	20,586	692,961

Ortalama uzama miktarında yaşlanma öncesine göre %15 civarında bir düşüş görülmüştür. 3.haftada yaşlanma etkisi görülmemişken ilk defa 6.hafta sonunda ciddi yaşlanma etkisi görülmüştür. Çekme dayanımındaysa çok daha ciddi bir değişim olmuş durumdadır. 3.hafta sonunda XLPE'den daha iyi değerler gösteren LDPE 6.hafta sonunda dramatik bir düşüş göstermiştir ve XLPE ile aynı çekme dayanımına gelmiştir. Daha uzun yaşlandırma yapılarak bu düşüşün ne kadar devam edeceği başka bir çalışmanın konusu olabilir. Ancak buradaki deneylere dayanarak LDPE'nin XLPE'den çekme dayanımı konusunda yarışabileceği hatta kısmen daha iyi olabileceği görülmüştür. Nem yaşlanması sonuçlarıyla devam edilmiştir.



Şekil 4.88 LDPE nem yaşlanması 6.hafta çekme dayanımı

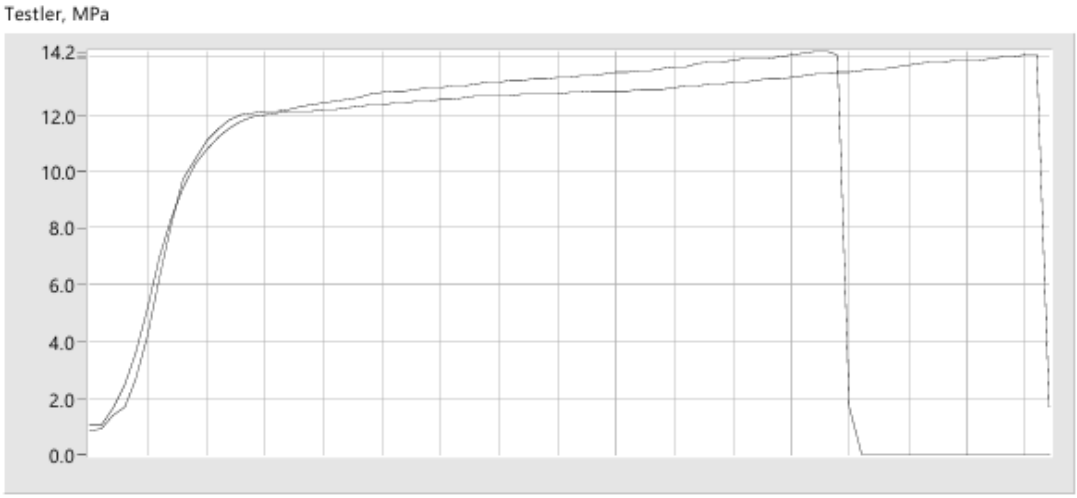
Tablo 4.10 LDPE nem yaşlanması 6.hafta uzama miktarı ve çekme dayanımı

İstatistik	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama Miktarı (%)
Maksimum	22,533	672,408
Minimum	22,019	661,553
St. Sapma	0,514	10,855
Ortalama Değer	22,276	666,980

Uzama miktarında %5'lik bir değişim olmuştur. Ancak malzeme elastikiyetindeki bu sınırlı değişime karşın çekme dayanımında %25'lik dramatik bir düşüş yaşanmıştır. Zamanla nemin LDPE yapısına nüfuz etmesi çekme dayanımına ciddi anlamda etki etmiştir. Ancak hala XLPE'den daha iyi değerler vermekte ve numuneler arasında neme karşı en dayanıklı yalıtkan olduğu görülmektedir. HFFR sonuçlarıyla devam edilmiştir.

4.2.3 HFFR Deney Sonuçları

HFFR termoplastik yalıtkanlar esnek olmayan ve içerisinde birçok katkı maddesi barındıran termoplastiklerdir. Çoğunlukla alçak gerilim iç tesisat kablolarında yalıtkan olarak kullanılmaktadır. Kullanımının temel amacı yangını ilerletmemesi hatta içinde bazı asidik maddelerin yanması veya karbonil grubu malzemelerin yanması sonucu alevi söndürmesidir. Bu yüzden çekme kopma testlerinde iyi bir performans vermesi beklenmemektedir. Yaşlanmamış numunelerin çekme dayanımı ve uzama miktarı aşağıdaki gibidir.

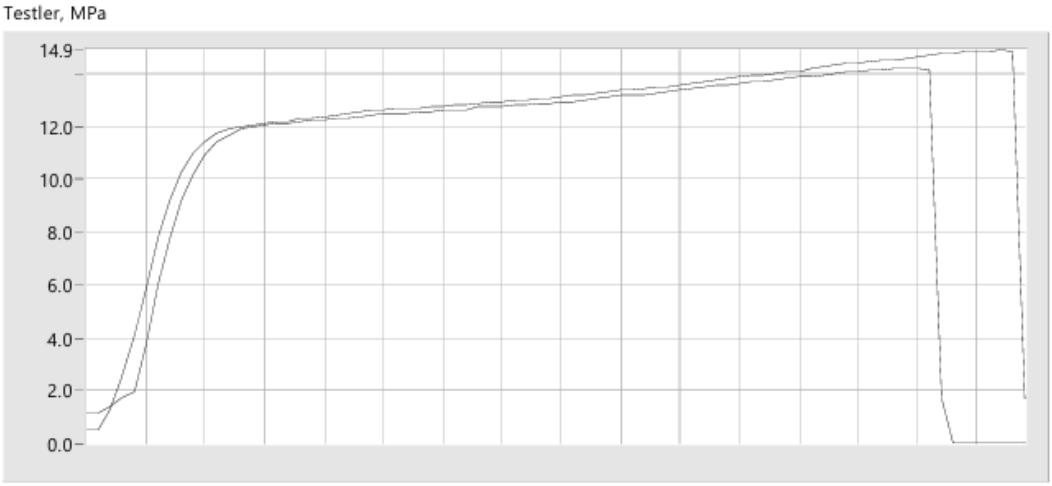


Şekil 4.89 HFFR yaşlanma öncesi çekme dayanımı

Tablo 4.11 HFFR yaşlanma öncesi uzama miktarı ve çekme dayanımı

İstatistik	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama Miktarı (%)
Maksimum	14,197	111,347
Minimum	14,091	88,788
St. Sapma	0,053	12,28
Ortalama Değer	14,144	99,067

HFFR termoplastik yalıtkanın yaşlanma öncesi uzama miktarı ve çekme dayanımı XLPE ve LDPE'ye göre çok daha düşük seviyededir. Yaşlanma sonrası değerleriyle devam edelim.

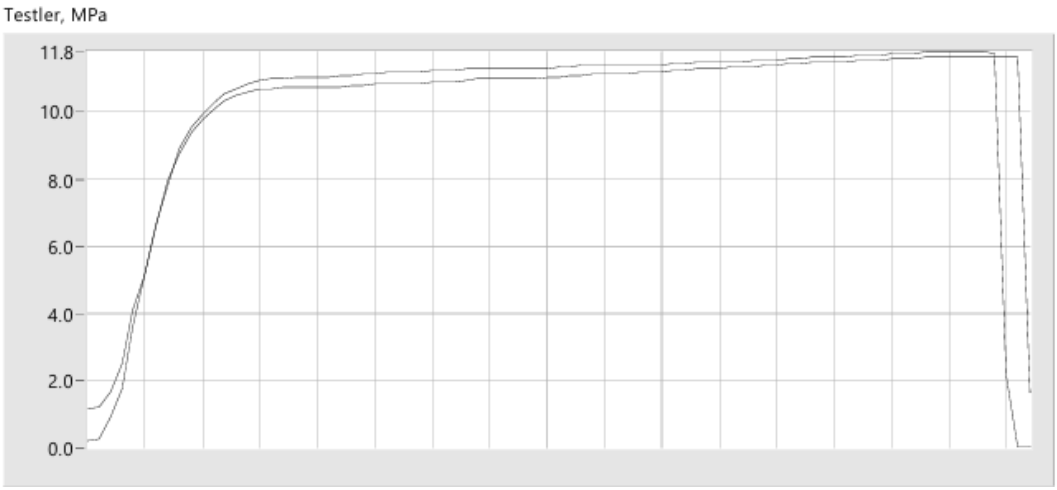


Şekil 4.90 HFFR termal yaşlandırma 3.hafta çekme dayanımı

Yaşlandırma öncesi 14,144 MPa değerinde çekme dayanımı olan HFFR yalıtkan yaşlanma sonrasında da 14,532 MPa çekme dayanımı göstermiştir. Yani numunenin sıcaklıktan etkilenmediğini hatta performansının iyileştiğini söyleyebiliriz. Uzama miktarında da ciddi bir değişim olmamıştır. Nem sonuçlarıyla devam edelim.

Tablo 4.12 HFFR termal yaşlanma 3.hafta uzama miktarı ve çekme dayanımı

İstatistik	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama Miktarı (%)
Maksimum	14,868	106,632
Minimum	14,197	95,984
St. Sapma	0,335	5,324
Ortalama Değer	14,532	101,308

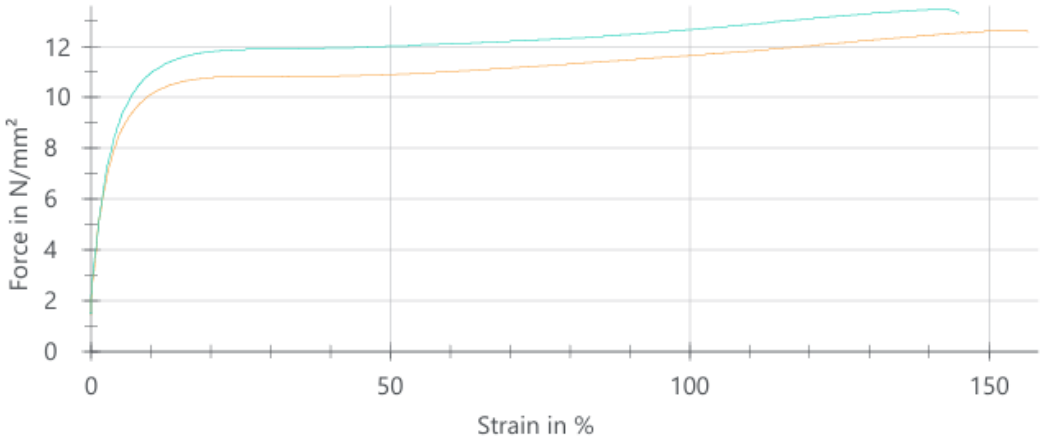


Şekil 4.91 HFFR nem yaşlanması 3.hafta çekme dayanımı

Tablo 4.13 HFFR nem yaşlanması 3.hafta uzama miktarı ve çekme dayanımı

İstatistik	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama Miktarı (%)
Maksimum	11,765	110,415
Minimum	11,618	107,979
St. Sapma	0,074	1,218
Ortalama Değer	11,691	109,197

Yaşlandırma öncesi 14,144 MPa değerinde olan çekme dayanımı nem etkisiyle 11,691 MPa seviyesine düşmüştür. Dielektrik performansındaki büyük nem etkisi burada da görülmüştür. %16,8 çekme dayanımında düşüş olmuştur. Uzama miktarı %99,067 seviyesinden, nem etkisinden sonra %109,197 seviyesine çıkmıştır. %10 civarında artış olmuştur. 6.hafta sonuçları aşağıda verilmiştir.

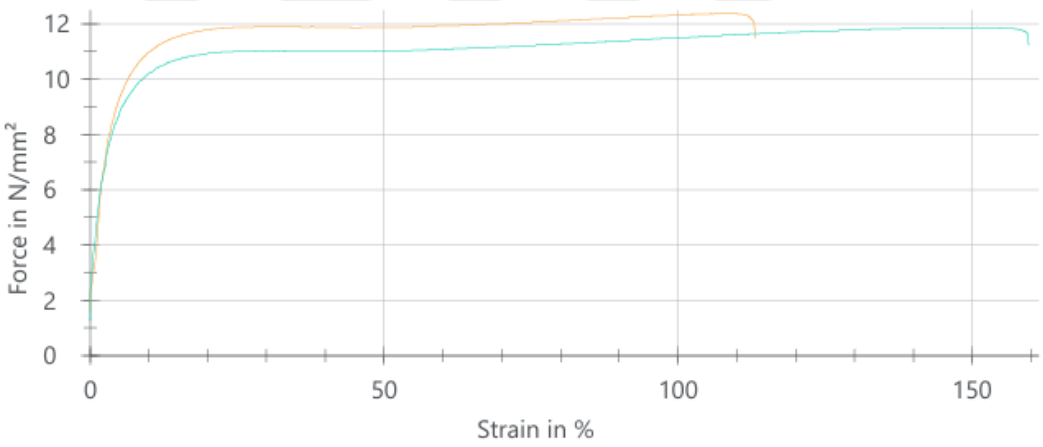


Şekil 4.92 HFFR termal yaşlandırma 6.hafta çekme dayanımı

Tablo 4.14 HFFR termal yaşlanma 6.hafta uzama miktarı ve çekme dayanımı

İstatistik	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama Miktarı (%)
Maksimum	13,555	156,569
Minimum	12,610	144,863
St. Sapma	0,945	5,324
Ortalama Değer	13,082	150,716

3.hafta sonunda uzama miktarında bir değişiklik gözlemlenmemişti ancak 6.hafta sonunda uzama miktarında ciddi bir iyileşme gözlemlenmiştir. Termal yaşlandırmanın numuneyi esnekleştirdiğini söyleyebiliriz. Çekme dayanımıysa 14,5 MPa seviyesinden 13 MPa seviyesine düşmüştür. Çekme dayanımının diğer yalıtkanlara nazaran ciddi anlamda kötü olduğunu söyleyebiliriz. Servis esnasında ciddi gerilmelere maruz kalırsa ciddi sorunlarla karşılaşılabilir. Bu açıdan XLPE'ye rakip olamayacağını söyleyebiliriz. Nem yaşlandırması sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.93 HFFR nem yaşlanması 6.hafta çekme dayanımı

Tablo 4.15 HFFR nem yaşlanması 6.hafta uzama miktarı ve çekme dayanımı

İstatistik	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama Miktarı (%)
Maksimum	12,399	139,614
Minimum	11,906	133,118
St. Sapma	0,493	6,496
Ortalama Değer	12,152	136,366

6.hafta nem yaşlandırması sonucunda çekme dayanımında küçük miktarda iyileşme olmuştur. Uzama miktarı ise %20 civarında bir artış göstermiş ve malzeme daha esnek hale gelmiştir. Çekme dayanımı ve uzama miktarı düşünüldüğünde XLPE'ye alternatif olmasının çok zor olduğu görülmektedir.

4.3 Delinme Gerilimi Testleri Deney Sonuçları

Delinme gerilimi testi kablo yalıtkanlarının performansını incelemek için çokça kullanılmıştır. Farklı delinme gerilimi ölçme yöntemleri ve uluslararası standartlarda ne şekilde deneylerin yapıldığı önceki bölümlerde anlatılmıştı. Bu bölümde yalnızca sonuçlar paylaşılacak ve Bölüm 4.4'te sonuçlar tartışılacaktır.

Numuneler çekme kopma testlerinde olduğu gibi 3 hafta yaşlandırılmıştır. Yaşlandırma sonucunda her yaşlandırma kabininden 3'er numune alınıp test edilmiştir. Test sonuçları aşağıdaki tablodaki gibi olmuştur. XLPE numunesinin tabloda olmama sebebi test edildiği deney kabında her delinmeye maruz bırakıldığında yağın delinip XLPE'nin zarar görmemesidir. XLPE için beklenen delinme gerilimi 60-70 kV mertebesinde tahmin edilmektedir. Ancak kullanılan yağ bu gerilimlere ulaşmadan delindiği için yalnızca LDPE ve HFFR üzerinde delinme gerilimi etkisi gözlemlenebilmiştir.

Bu deneyde IEC 60243-1'de [55] belirtilen standartla uygun olarak 500 V/sn hızla gerilim artacak şekilde ölçüm yapılmıştır. Yine önceki bölümlerde belirtildiği gibi ilgili IEC standardına uygun silindirik problar kullanılmıştır.

Tablo 4.16 LDPE ve HFFR yaşlanma öncesi ve 3.hafta delinme gerilimleri (kV)

	LDPE			HFFR		
	Yaşlanmamış	Sıcaklık	Nem	Yaşlanmamış	Sıcaklık	Nem
1. Numune	49,4	49,3	45,3	40,3	40,8	36,4
2. Numune	51,3	47,4	46,5	40,7	40,7	38,2
3. Numune	50,1	46,4	45	40,1	41	36
4. Numune	50,2	47,3	45,7	38,9	40,9	37,7
5. Numune	48,8	48,6	46	39,3	39,8	35,8
6. Numune	49,3	50,7	44,8	38,6	39,9	35,7

Görüldüğü üzere LDPE için sıcaklık delinme geriliminde büyük bir değişiklik oluşturmazken nem yaklaşık %10 delinme gerilimi düşüşüne neden olmuştur. HFFR için de sıcaklığın delinme gerilimine etkisi görülmezken nemin yaklaşık %10 delinme gerilimini düşürdüğü gözlemlenmiştir.

Tablo 4.17 LDPE ve HFFR 6.hafta delinme gerilimleri (kV)

	LDPE		HFFR	
	Sıcaklık	Nem	Sıcaklık	Nem
1. Numune	47,5	42,3	39,8	35,4
2. Numune	48,4	39,5	41,7	36,8
3. Numune	49,4	39,9	40,9	37
4. Numune	48,3	41,6	40,7	37,4
5. Numune	46,6	42	39,8	38,6
6. Numune	47,7	40,9	39,9	35

LDPE için sıcaklık ciddi etki etmemeye devam etmiştir. Ancak kısmen etki etmiş ve delinme gerilimini yaklaşık %4 daha düşürmüştür. Nem etkisi ise devam etmiştir 6 hafta sonunda ortalama %20 delinme gerilimi düşmüştür. HFFR için sıcaklığın etkisi hala görülmezken nem etkisi de 3.haftaya göre ciddi bir etki göstermemiştir.

4.4 Deney Sonuçlarının Tartışılması

Öncelikle HFFR bir yalıtkan hakkında literatürde çok fazla dielektrik performans deneyleri bulunmamaktadır. Bu yüzden yaptığımız bu deneylerde bir HFFR yalıtkanın olması deneysel bir çalışma olmuştur. HFFR malzemenin sıcaklıkla beraber tan delta ve kayıp güç faktörlerinde iyileştiği gözlemlenmiştir. Bunun nedeni termal yaşlandırmayla beraber malzemenin yapısında meydana gelen kimyasal değişimlerin kablonun dielektrik yapısına olan etkisidir. Termal yaşlandırmayla beraber alev geciktirici ve HFFR'lerde kullanılan katkı maddelerinin ısınması malzemenin kimyasal yapısında değişiklikler meydana getirmektedir. Örneğin bu malzemelerde malzemenin oksijenle bağlantısını kesmek için üzerinde zamanla bir karbon tabakası oluşmaktadır. Oksijenle bağlantısı kesilen yalıtkanda alev kendiliğinden sönmektedir. Bu gibi bir kimyasal değişiklik HFFR'nin direncinin artmasına neden olmuş ve dielektrik kayıp faktörü değerlerinin düşmesine sebep olmuş olabilir. Nitekim malzeme direncinin yaşlanma sonrasında öncesine göre 4,5 katına çıktığı sığa değerininse nerdeyse değişmediği gözlemlenmiştir. Bir başka neden sıcaklıkla beraber polimer zincirlerinin kırılarak diğer zincirlerle çapraz bağlanması sonucu malzemenin dielektrik özelliklerindeki iyileşme olabilir. Bir diğer neden de alev geciktiricilerin yüksek sıcaklıklarda malzeme içerisinde daha homojen yayılımı sonucu malzemenin dielektrik özelliklerinde iyileşme gözlemlenmiş olabilir. Son olarak termal yaşlandırma sırasında malzemenin içindeki nem -eğer varsa- termal

yaşlandırmayla beraber malzemeden uzaklaştırılmış ve dielektrik kayıp faktörü iyileşmiş olabilir. Tabii ki termal yaşlandırmayla beraber malzemenin kristalin yapısındaki düzelme, amorf bölgelerin daha düzgün hale gelmesi de etkili olmuş olabilir. Nitekim termal yaşlandırmanın delinme gerilimi üzerinde de negatif bir etkisinin olmadığı yapılan deneylerde gösterilmiştir. Aynı şekilde çekme kopma testlerinde de negatif bir etki gözlenmemiş hatta pozitif yönde küçük değişimler olmuştur. Bu demek oluyor ki HFFR malzeme üzerinde yapılan termal yaşlandırma, malzemeyi dielektriksel ve fiziksel olarak pozitif yönde etkilemiş ya da hiç etkilememiştir.

XLPE için çekme dayanımı ve uzama miktarı deneyleri termal yaşlandırma için iyi sonuçlar vermiştir ancak XLPE'nin nemden sıcaklığa göre çok daha fazla etkilendiği görülmüştür. Buradan çıkarılabilecek sonuç XLPE'nin nem yaşlandırması sonucu fiziksel özelliklerinde, özellikle çekme dayanımında ciddi düşüş gözlemlenmiştir. Aynı şekilde dielektrik kayıp faktörü değerlerinde de ciddi artışlar gözlemlenmiştir. Yaşlandırma öncesi 12 kV 50 Hz'de %1 değerine ulaşılmışken, yaşlandırma sonrası bu değer %3,64 olmuştur. Bunun nedenlerinden biri nem kabinindeki XLPE'nin oksidasyonu olabilir. Oksidasyona neden olan bir sürü faktör bulunmaktadır. Nem, oksijen, UV ışınları, su, sıcaklık ve dielektrik stres gibi sebepler XLPE'nin oksidasyonuna neden olabilir. Nem kabinindeki XLPE'lerin neme ve oksijene maruz kalması oksidasyonu hızlandırmış ve serbest radikallerin artışına neden olmuş olabilir. Bunun sonucunda nem kabinindeki XLPE'lerde daha yüksek bozulmalar görmüş olmamız muhtemeldir. Yüksek değişimin bir diğer nedeni XLPE'ye nüfuz eden su moleküllerinin çapraz bağları zayıflatması ve malzemenin izolasyon özelliklerinin bozulması, polimer zincirlerinin kısalması ve daha düşük çapraz bağlanmaya yol açması sonucu izolasyon özelliklerinin bozulması olabilir. Bir diğer neden de malzeme yüzeyindeki iyonlaşma olabilir. İyonlar özellikle orta ve yüksek gerilimde kayıp gücü artırıp dielektrik kayıp faktörünü yükseltebilir.

Delinme gerilimiyle ilgili olarak XLPE'nin gerilimini tam bilmemekle beraber yaşlandırma uygulanmış ya da uygulanmamış halleri fark etmeksizin XLPE delinememiştir. Muhtemel delinme gerilimi 60-90 kV civarında olması beklenmektedir. Sonraki çalışmalarda delinme gerilimi testleri için numunelerin 1mm kalınlığında seçilmesi ideal olacaktır.

LDPE delinme gerilimi haricinde çok kötü performans göstermemiştir. Tan delta değerleri ise XLPE'den daha iyi gelmiştir. Kayıp güç için nem yaşlanmasında XLPE'den daha kötü sonuçlar vermiştir. Yapısı gereği uzaması en uzun yalıtkandır ve sıcaklık ve neme karşı dayanıklı olduğunu çekme kopma testlerinde de göstermiştir. Delinme gerilimi testinde 3 hafta nemde yaşlanma sonrasın yaklaşık %10 delinme gerilimi düşüşü göstermiştir. Bu özelliği onun bir orta gerilim izolasyonu olma şansını oldukça zorlaştırıyor. Tabii ki bu derece esnek bir yalıtkanın orta gerilim yalıtkanı olması beklenemez ancak dielektrik performansı ve kopma kuvveti oldukça iyidir ve neme karşı kısmen dayanıklıdır. LDPE'nin performansındaki gerçek düşüşü görebilmek için termal yaşlandırmadan çıkar çıkmaz test edilmesi denenebilir, zira termoplastikler ısıyla formunu koruyamasa da sıcaklık düştüğünde tekrar donup eski formuna gelebilirler. Bu yüzden numune sıcaklığı düşmeden test edilebilme şansı olsaydı bu şekilde test etmek performansını ölçmek açısından çok daha iyi olurdu. Literatür özetinde bunların online sistemlerle izlenebildiğini belirtmiştik. Eğer böyle bir sisteme erişiminiz mevcutsa yaşlanması elektriksel yaşlandırma yoluyla yapıp online olarak izlemek LDPE'nin yaşlanma performansını ortaya koymak adına daha etkili olacaktır.

5
SONUÇ

Bu çalışmada kablo yalıtkanları üzerinde elektriksel ve fiziksel testler yapılarak kabloların termal ve nem yaşlandırılması sonuçları gösterilmiştir. Termal yaşlandırma için 100 °C sıcaklıkta 6 haftalık yaşlandırma yapılmıştır. Nem yaşlandırması için yine 6 haftalık bir yaşlandırma süreci olmuştur. 1 haftalık periyotlar halinde fırın ve nem kabininden numuneler alınıp test edilmiş ve ortalama veriler önceki bölümlerde paylaşılmıştır. Bu veriler sıcaklık ve nemin orta gerilim kablo yalıtkanları üzerindekini etkisini hafta hafta ortaya koymuştur. Tan delta ve kayıp güç ölçümlerinde Yıldız Teknik Üniversitesi yüksek gerilim laboratuvarında bulunan Omicron CPC 100 cihazı kullanılmıştır. 2-12 kV ve 50-400 Hz. aralığında ölçümler alınmış ve yalıtkanların farklı gerilim ve farklı frekans değerlerindeki performansları gösterilmiştir. Ölçümler IEC standartlarına uygun deney kabı ve proplar kullanılarak yapılmıştır ve ilgili cihaz TSE tarafından kalibre edilmektedir.

Yine Yıldız Teknik Üniversitesi yüksek gerilim laboratuvarında yapılan deneylerden biri de yüksek gerilimde delinme dayanımı testleridir. Burada dielektrik kayıp faktörü ve kayıp güç ölçümünde kullanılan problar kullanılmıştır. Delinme gerilimi dielektrik performans ölçümünde en etkili yöntemlerden biridir. Pek çok ölçüm sistemi olmakla beraber 500 V/sn artışla yapılan ölçüm yönteminin en sağlıklı olduğu düşünülmüş ve uygulanmıştır. Deney sonucunda XLPE, LDPE, HFFR yalıtkanların termal ve nem yaşlanması sonucu delinme geriliminin zamanla nasıl değiştiği gösterilmiştir. Deney sonuçları her numune için tablolarda belirtilerek analiz edilmiştir.

Bilindiği üzere özellikle orta gerilim kabloları zorlu şartlarda çalışmaktadır. Özellikle orta gerilim yeraltı kabloları düşünüldüğünde bu kablolar çok farklı etkilere maruz kalmaktadır. Yol çalışmaları, seller, depremler ve birçok farklı koşul bu kabloları fiziksel strese sokmakta ve arızaya girmesine neden olmaktadır.

Örneğin bir kablonun doğrusal bir hatta ilerlemesi yerine bükülmesi, büküldüğü noktada elektrik alanın yoğunlaşmasına, kısmi deşarjın artmasına ve delinme gerilimin o noktada düşmesine neden olmaktadır. Unutmamak gerekir ki XLPE gibi yalıtkanların yüksek elektrik alanlara sürekli maruz kalması oksitlenme sürecini hızlandırmakta ve bu kabloların dielektrik özelliklerini zayıflatmaktadır.

Bu sebeple numunelerin fiziksel dayanımı ve kopma kuvveti bizim için önem arz etmektedir. Bu yüzden çekme kopma kuvveti testleri IEC standartlarında belirtilen numune ölçüleri göz önünde bulundurularak alındı ve ulusal bir kablo üreticisinin Türkak tarafından akredite edilmiş laboratuvarlarında çekme kopma kuvveti testleri yapıldı. Raporları önceki bölümlerde paylaşılmıştır.

Ölçümlerin farklı frekanslarda yapılması aynı yalıtkanın farklı frekans seviyelerinde nasıl bir güç kaybı yaşayacağını ve dielektrik parametrelerinin nasıl değişeceğini konusunda fikir vermektedir.

Bir diğer faydalı sonuç ise HFFR yalıtkanla ilgili deneyler olmuştur. Bu deneylerin sonucunda orta gerilimde dış kılıf olarak kullanılan bu termoplastiklerin izolasyon olarak kullanılıp kullanılamayacağı incelenmiştir. Yangın performansına yönelik üretilen bu yalıtkanlar yandığında dışlarında bir karbon tabakası oluşmakta ve içerinde yanan bazı katkı maddeleri kablonun kimyasal yapısını değiştirmektedir. Bunların dielektrik performans üzerindeki etkisini bu çalışma kısmen göstermiştir diyebiliriz. Daha yüksek sıcaklıklarda yapılacak deneyler muhtemelen bu etkinin daha iyi gözlemlenebilmesi için iyi olacaktır. Bununla beraber tan delta ve delinme gerilimi testlerinde sıcaklık yaşlandırılması yapılan numunelerin performansının iyileşmesinin nedeninin kesin olarak bu olduğunu da söyleyemeyiz. Ancak termoplastiklerin giderek orta ve yüksek gerilim seviyelerinde kullanımının yaygınlaşması desteklenmektedir, termosetlerin fiziksel ve elektriksel bozunmalara karşı tersinmez olması ve termoplastiklerin geri dönüştürülebilir ve kolay işlenebilir olması termosetleri giderek daha cazip bir yalıtkan haline getirmektedir.

Önceki bölümlerde bazı termosetlerin HVDC hatlarda kullanımıyla ilgili çalışma ve çabaların olduğundan bahsedilmişti. Bu bağlamda tez çalışmasında bu tip bir termoplastiğin performans incelemesinin yapılması uygun görülmüştür.

Ortaya koyulan sonuçlar yalnızca kablo yalıtkanlarının nem ve sıcaklık yaşlandırmasıyla değişen performansını ölçmekle kalmayıp aynı zamanda ömür tahmini metotları için veri kaynağı olarak kullanılabilecektir.

Tezin bir diğer katkısı yaşlandırma süreçleriyle ilgili olmuştur, yaşlandırma süreçlerinin sürekli olarak yalıtkanın performansının kötüye gitmesi olmadığını, etkilerin gözlemlenmesi için uzun süreli deneylere ihtiyaç duyulduğunu göstermiştir. Bazen bir yalıtkanın 1-2 haftalık yaşlanmalar sonucunda performansı değişmez ve hatta iyileşirken 3. haftada yaşlanma etkisi ciddi bir şekilde görülebilmektedir. Örneğin XLPE bir numuneyi test ediyorsanız belki bu numune içindeki antioksidanlar nedeniyle sıcaklık ve nem etkisiyle serbest radikallere maruz kalmamış ancak belirli bir süre sonunda antioksidanların tükenmesiyle oksitlenme başlamış ve performansı gerilemeye başlamıştır. Yapılan tez çalışması yaşlandırma çalışmalarında zamanın ne kadar önemli bir kriter olduğunu ortaya koymuştur.

Tezden çıkarılacak bir diğer sonuç XLPE'nin yaşlandırma etkilerine karşı performansıdır, her ne kadar kablo içerisinde nem etkisine bu denli maruz kalmıyor olsa bile nem kabininde yoğun neme maruz kalması sonucu XLPE için nem faktörünün ne denli önemli olduğu ortaya konmuştur. Özellikle çekme kopma testlerinde çekme dayanımı 25 MPa seviyesinden 18 MPa seviyesine düşmesi ciddi bir nem etkisi olduğunu gösteriyor. XLPE üzerinde nemin sadece elektriksel değil aynı zamanda fiziksel etkileri de bu çalışmada ortaya konulmuştur.

Günümüzde HFFR termoplastikler sert bir yapıya sahip olup herhangi bir esneklik göstermezler. Yaptığımız çalışmalarda HFFR'deki uzamanın %100 civarında kaldığını ve nerdeyse hiç esnemediğini gördük. Ayrıca çekme dayanımı özellikle nem yaşlandırma sonucu 11 MPa seviyesinde kalmış olup çok kötü bir performans göstermiştir. Çarpıcı bir sonuç olarak bu numunenin sıcakla beraber performansı iyileşirken nemle beraber performansının ciddi bir şekilde düştüğü gözlemlenmiştir.

Tez çalışmasının termoplastikler ve termosetlerle ilgili çalışmalara ilham kaynağı olması ve rehberlik etmesi beklenmektedir.

KAYNAKÇA

[1] Wang, P., Raghuveer, M. R.,McDermid, W., ve Bromley, J. C. (2001). A Digital Technique for The On-line Measurement of Dissipation Factor and Capacitance. IEEE Transanctions on Dielectrics and Electrical Insulation, 8 (2), 228–232.

[2] Zaengl, W. S. (2003). Dielectric Spectroscopy In Time and Frequency Domain for HV Power Equipment. I. Theoretical Considerations. IEEE Electrical Insulation Magazine, 19 (5), 5–19.

[3] Arora, R., Mosch, W., (2011). High Voltage and Electrical Insulation Engineering. IEEE Press.

[4] Ponniran, A., Kamarudin, M. S. (2008). Study on the performance of underground XLPE cables in service based on tan delta and capacitance measurements. IEEE Electrical Insulation Magazine, 33 (4), 27-33.

[5] Hvidsten, S., Adeen, L. ve Utveckling, V. (2005). Condition Assessment Of 12 and 24 kV XLPE Cables Installed During The 80's . Results From a Joint Norwegian / Swedish Freseaarch Project. 21 (6), 1–11.

[6] Mazzanti, G., Montanari, G. C., ve Simoni, L. (1997). Insulation Characterization In Multistress Conditions by Accelerated Life Tests: An Application to XLPE and EPR For High Voltage Cables. IEEE Electrical Insulation Magazine, 13 (6), 24–34.

[7] Nikolajevic, S.V. (2002). The behavior of water in XLPE and EPR cables and its influence on the electric characteristics of insulation. IEEE Transactions on Power Delivery, 14 (1), 39-45.

[8] Andritsch, T., Vaughan, A., Stevens, G. C. (2017). Novel insulation materials for high voltage cable systems. IEEE Electrical Insulation Magazine, 33 (4), 27-33.

[9] Nikolajevic, S. V., Kostoski, D. D. (1998). Accelerated aging of cross-linked polyethylene (XLPE and TR XLPE) cable insulations in wet conditions. 1998 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Atlanta, USA, 25-28 October 1998.

[10] Peng, D., Yang, D., Wang, C. and Li, M. (2009). The Influence Of Transformer Oil Aging to Dielectric Dissipation Factor and Its Insulating Lifetime. Asia-Pacific Power Energy Engineering Conference, 28-31 March, Wuhan, China, 1–4.

[11] Hampton, R. N. (2008). Some Of The Considerations For Materials Operating Under High-Voltage Direct-Current Stresses. IEEE Electrical Insulation Magazine, 24 (1), 5–13.

[12] Abderrazzaq, M. H. (2013). The effect of high frequency, high voltage supply on the growth of electrical trees on cross linked polyethylene insulation of power cables. 2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD), Bologna, Italy, 30 June – 4 July 2013.

[13] Adhikari, N. (2022). Condition Monitoring of High Voltage Cable based on Dielectric Power Factor Measurements. 2022 International Conference on Electronics and Renewable Systems (ICEARS), Tuticorin, India, 16-18 March 2022.

[14] Yamaguchi, T. (2011). Influence of structural change by water-tree degradation on electrical-tree inception voltage. Proceedings of 2011 International Symposium on Electrical Insulating Materials, Kyoto, Japan, 06-10 September 2011.

[15] Hayashi, Y., Suzuoki, Y., Kato, T., Komori, F., Mashima, H. (2009). Temperature dependence of inception of electrical tree from water-tree degradation. 2009 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Virginia Beach, USA, 18-21 October 2009.

[16] Jouini, Z., Malec, D., Valzed-Nava, Z. (2016). Effect of mechanical prestress on the dielectric strength of alumina. 2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD), Montpellier, France, 03-07 July 2016.

[17] Liu, H., Wang, S., Li, S., Wu, Y., Jiang, L., Lang, J., Yuan, J., Liu, J. (2023). Effect of thermo-oxidative aging on thermal elongation performance of XLPE insulation for high-voltage cables. Polymer Degradation and Stability, 210.

[18] Blivet, C., Larche, J. F., Israeli, Y., Bussiere, P. O., Gardette, J. L. (2021). Thermal oxidation of cross-linked PE and EPR used as insulation materials: Multi-scale correlation over a wide range of temperatures. Polymer Testing, 93.

[19] Liu, S., Veysey, S. W., Fitfield, L. S., Bowler, N. (2018). Quantitative analysis of changes in antioxidant in crosslinked polyethylene (XLPE) cable insulation material exposed to heat and gamma radiation. Polymer Degradation and Stability, 156, 252-258.

[20] Hernandez-Mejia, J. C., Perkel, J., Harley, R., Hampton, N. ve Hartlein, R. (2009). Correlation Between Tan Delta Diagnostic Measurements and Breakdown Performance at VLF For MV XLPE Cables. IEEE Transanctions on Dielectrics and Electrical Insulation, 16 (1), 162–170.

[21] Hernandez-Mejia, J. C., Harley, R., Hampton, N. ve Hartlein, R. (2009). Characterization Of Ageing For MV Power Cables Using Low Frequency Tan Delta Diagnostic Measurements, IEEE Transanctions on Dielectrics and Electrical Insulation, 16 (3), 862–870.

[22] Durman, V. and Lelak, J. (2010). Influence Of Radiation On The Dielectric Properties Of XLPE Based Insulation Systems, Journal of Electrical Engineering, 61 (4), 229–234.

[23] Seguillon, J., Pretrel, H., Suard, S. (2023). Experimental study of a travelling fire along a cable tray assembly in a mechanically ventilated enclosure. Fire Safety Journal, 141.

[24] Zhou, K., Yuan, H., Akram, S., Meng, P., Mahmood, A., Amir, M. and Imran, M. (2021). Healing of water tree aged cables using rejuvenation nanofluid. Polymer Testing, 102.

[25] Banhegyi, G. (2024). CoMPatibility issues in high voltage DC cable insulation development. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 7 (4), 454-465.

[26] Uydur, C. C., Arikan, O., Kucukaydin, B., Dursun, B., Kumru, C. F. (2019). The Effects of Overvoltage Aging on 20 kV XLPE Power Cable. 2019 11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, Türkiye, 28-30 November 2019.

[27] Qin, S., Xu, Q., Wang, Q., Zhang, J., Ju, Z., Hou, Z., Lian, H., Tao, W. and Zhang, J. (2022). Study on temperature rise characteristics of 110 kV XLPE cable under different service years considering dielectric loss. Energy Reports, 8 (8), 493-501.

[28] Zu, W., Wang, X., Liang, A., Zhao, Y., Fan, X. and Liu, G. (2020). Thermal Effect of Short-term Overload on High-voltage Cross-linked Polyethylene (XLPE) Cable Insulation. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Guangzhou, China, 20-21 December 2019.

[29] Placek, V., Kohout, T., Kabrt, J. and Jiran, J. (2021). The influence of mechanical stress on cable service lifetime. Polymer Testing, 30 (7), 709-715.

[30] Arıkan, O., Uydur, C. Ç. and Kumru, C. F. (2023). Insulation evaluation of MV underground cable with partial discharge and dielectric dissipation factor measurements. Electric Power Systems Research, 220.

[31] Yang, Y., Hepburn, D. M., Zhou, C., Zhou, W., Jiang, W. and Tian, Z. (2017). On-line monitoring and analysis of the dielectric loss in cross-bonded HV cable system. Electric Power Systems Research, 149. 89-101.

[32] Arıkan, O., Uydur, C. Ç. and Kumru, C. F. (2022). Prediction of dielectric parameters of an aged mv cable: A coMParison of curve fitting, decision tree and artificial neural network methods. Electric Power Systems Research, 208.

[33] Hui, L., Nelson, J. K. and Schadler, L. S. (2010). Hydrothermal aging of XLPE/silica nanocomposites. 2010 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectic Phenomena, West Lafayette, IN, USA, 17-20 October 2010.

[34] Mecheri, Y., Nedjar, M., Lamure, A., Aufray, M. and Drouet, C. (2010). Influence of moisture on the electrical properties of XLPE insulation. 2010 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectic Phenomena, West Lafayette, IN, USA, 17-20 October 2010.

[35] Douar, M. A., Beroual, A. and Souche, X. (2014). CoMParative study of AC breakdown voltage for various polymers: Influence of electrodes shape, thermal and hydrothermal ageing. 2014 ICHVE International Conference on High Voltage Engineering and Application, Poznan, Poland, 08-11 September 2014.

[36] Dabbak, S. Z., Illias, H. A. and Ang, B. C. (2017). Effect of surface discharges on different polymer dielectric materials under high field stress. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 24 (6), 3758-3765.

[37] Dao, N. L., Lewin, P. L., Hosier, I. L. and Swingler, S. G. (2010). A coMParison between LDPE and HDPE cable insulation properties following lightning impulse ageing. 2010 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics, Potsdam, Germany, 04-09 July 2010.

[38] Dao, N. L., Lewin, P. L., Hosier, I. L. and Swingler, S. G. (2010). The changes in electrical properties of XL4421 insulation under repetitive lightning impulse voltages. 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, San Diego, CA, USA, 06-09 June 2010.

[39] Ji, M., Colin, X., Liu, W., Chi, X., Chatenet, S. and Wei, W. (2024). CoMParison of the performances and aging mechanisms of XLPE and EVA insulation during their thermal oxidative aging. Polymer Degradation and Stability, 222.

[40] Lv, H., Lu, T., Xiong, L., Zheng, X., Huang, Y., Ying, M., Cai, J. and Li, Z. (2020). Assessment of thermally aged XLPE insulation material under extreme operating temperatures. Polymer Testing, 88.

[41] Alghamdi, A. S. and Desuqi, R. K. (2020). A study of expected lifetime of XLPE insulation cables working at elevated temperatures by applying accelerated thermal ageing. Heliyon, 6 (1).

[42] International Electrotechnical Commission. (2023). *Electric and optical fibre cables - Test methods for non-metallic materials - Part 501: Mechanical tests - Tests for determining the mechanical properties of insulating and sheathing compounds* (IEC 60811-501:2012/AMD2:2023).

[43] Harper, C. A. (2006). *Handbook of Plastics Technologies*. The McGraw-Hill CoMPanies.

[44] Brydson, J. A. (1999). *Plastics Materials*. Former Head of the Department of Physical Sciences and Technology, Polytechnic of North London.

[45] Pechman, V. (1898). Chemistry Ber. 31, 2643.

[46] Bamberger, E. and Tschirner, F. (1900). Chemistry Ber. 33, 955.

[47] Başak, T. K. (2012). *Electrical Engineering Materials*. New Academic Science.

[48] Xavier, S. F. (2023). *Thermoplastic Polymer Composites*. Gujarat, India, Scrivener Publishing.

[49] Gupta, R. K. (2023). Specialty Polymers. Florida, USA, CRC Press.

[50] Pielichowski, K. and Pielichowska, K. *Thermal Analysis of Polymeric Materials*. Cracow, Poland, Wiley-VCH.

[51] Ray, S. S. and Kuruma, M. (2020). *Halogen-Free Flame-Retardant Polymers*. Springer, 294.

[52] Bansal, G. Gautam, R. K. Misra, J. P. Kishore, C. Mishra, A. and Verna, A. (2024). 5 - Evaluation of mechanical and thermal properties of thermosetting polymer composites. Dynamic Mechanical and Creep-Recovery Behavior of Polymer-Based Composites, 53-68.

[53] Nazrin, A., Kuan, T. M., Mansour, D. E. A., Farade, R. A., Ariffin, A. M., Rahman, M. S. A. and Wahab, N. I. B. A. (2024). Innovative approaches for augmenting dielectric properties in cross-linked polyethylene (XLPE): A review. Heliyon, 10 (15).

[54] Chen, J., Liu, T., Li, A., Zhang, C., Zhao, H. and Wang, X. (2023). Improvement on water tree resistance and electrical properties of XLPE by adopting triallyl isocyanurate. Polymer Testing, 123.

[55] International Electrotechnical Commission. (2013). *Electric strength of insulating materials - Test methods - Part 1: Tests at power frequencies*. (IEC 60243-1:2013).

[56] International Electrotechnical Commission. (2013). *IEC 60243-3: Insulation co-ordination – Part 3: Use of standard reference materials for insulation breakdown tests* (3rd ed.).

[57] Hedir, A. Bechouche, A. Moudoud, M. Teguar, M. Lamrous, O. and Rondot, S. (2020). Experimental and predicted XLPE cable insulation properties under UV radiation. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 28 (3), 1763-1775.

[58] Aljoumaa, K. and Allaf, A. W. (2021). Morphology, Structure, Properties and Applications of XLPE. Crosslinkable Polyethylene, 125-166.

[59] International Electrotechnical Commission. (2012). *IEC 60811-507:2012 - Electric and optical fibre cables – Mechanical tests – Part 507: Tests for the determination of the hot set behaviour of insulating materials.* International Electrotechnical Commission.

[60]

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Göktaş, Y. C., Ayaz, R. and Kumru, C. F. (2025). Investigation of Performance Factors of Medium Voltage Cable Insulation Materials. 4. Uluslararasi Matematik ve Mühendislik Kongresi, Bursa, Türkiye, 24-26 Jan. 2025.